

552,906

(12)特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2004年10月28日 (28.10.2004)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2004/091865 A1(51) 国際特許分類⁷:

B25J 5/00

(72) 発明者; および

(21) 国際出願番号:

PCT/JP2004/004457

(75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 河合 雅和
(KAWAI, Masakazu) [JP/JP]; 〒3510193 埼玉県和光市中央1丁目4番1号株式会社本田技術研究所内
Saitama (JP).

(22) 国際出願日:

2004年3月29日 (29.03.2004)

(74) 代理人: 佐藤辰彦, 外 (SATO, Tatsuhiko et al.); 〒1510053 東京都渋谷区代々木2-1-1 新宿マイinzタワー16階 Tokyo (JP).

(25) 国際出願の言語:

日本語

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FL, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(26) 国際公開の言語:

日本語

(30) 優先権データ:

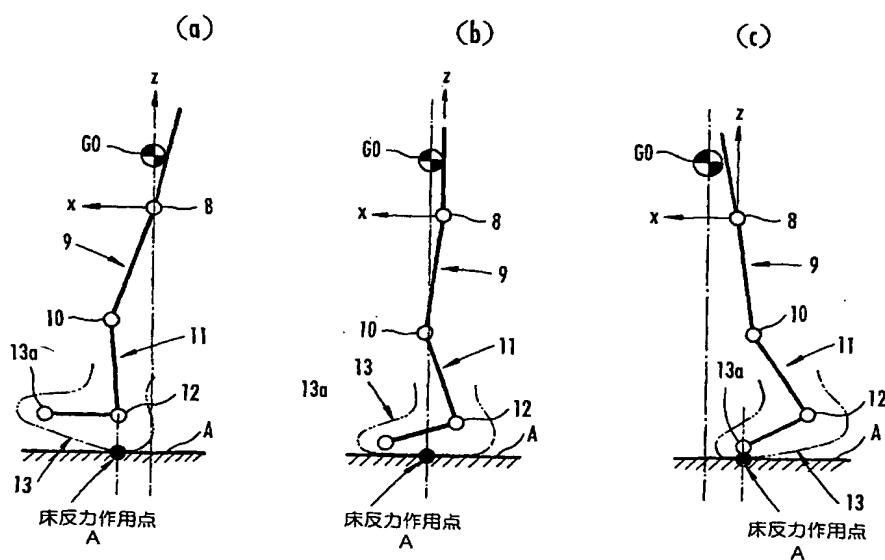
特願2003-112893 2003年4月17日 (17.04.2003) JP

(71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 本田技研工業株式会社 (HONDA MOTOR CO., LTD.) [JP/JP]; 〒1078556 東京都港区南青山二丁目1番1号 Tokyo (JP).

[続葉有]

(54) Title: METHOD OF ASSUMING ACTING POINT OF FLOOR REACTION FORCE TO BIPED WALKING MOBILE BODY AND METHOD OF ASSUMING JOINT MOMENT OF BIPED WALKING MOBILE BODY

(54) 発明の名称: 二足歩行移動体の床反力作用点推定方法及び二足歩行移動体の関節モーメント推定方法



A...FLOOR REACTION FORCE ACTING POINT

(57) Abstract: During the movement, such as walking on a flat ground, of a biped walking mobile body, the position of the gravity center (G0) of the mobile body, the position of an ankle joint (12) of each leg body (2), and the position of a metatarsophalangeal joint (13a) of a foot portion (13) are grasped one after another. Then, in accordance with relative positional relationship between the positions grasped, the position in the horizontal direction of an acting point of reaction force to the leg body (2) is assumed. The assumption is made in accordance with the position of the gravity center (G0) with respect to a moving direction of the mobile body. That is, when the gravity center (G0) is behind the ankle joint (12), the position of a floor reaction force acting point in the horizontal direction

[続葉有]

WO 2004/091865 A1



(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ヨーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ(AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:
— 國際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

is assumed to be at the ankle joint (12), when the gravity center (G0) is between the ankle joint (12) and the metatarsophalangeal joint (13a), it is assumed to be at the gravity center (G0), and when the gravity center (G0) is forward of the metatarsophalangeal joint (13a), at the metatarsophalangeal joint (13a). The position in the vertical direction of the floor reaction force acting point is assumed based on the vertical distance from the ankle joint (12) to a landing surface.

(57) 要約: 二足歩行移動体の平地歩行等の運動中に、二足歩行移動体の重心G0の位置と各脚体2の足首関節12の位置と足平部13の中足趾節関節13aの位置とを逐次把握し、それらの相対的位置関係に応じて接地している脚体2の床反力作用点の水平方向位置を推定する。重心G0が二足歩行移動体の進行方向で足首関節12の後側にあるか、足首関節12と中足趾節関節13aとの間にあるか、中足趾節関節13aの前側にあるかで、それぞれ足首関節12、重心G0、中足趾節関節13aの水平方向位置を床反力作用点の水平方向位置とする。床反力作用点の鉛直方向位置は、足首関節12から接地面までの鉛直方向距離に基づき推定する。

明細書

二足歩行移動体の床反力作用点推定方法及び二足歩行移動体の関節モーメント推定方法

技術分野

5 本発明は、人間や二足歩行ロボット等の二足歩行移動体の各脚体毎の床反力作用点の位置を推定する方法に関する。さらに、その床反力作用点の位置の推定値を用いて二足歩行移動体の脚体の関節に作用するモーメントを推定する方法に関する。

10 背景技術

例えば人間の歩行動作を補助する歩行アシスト装置の動作制御や、二足歩行ロボットの移動動作の制御を行なう場合、人間や二足歩行ロボットの脚体に作用する床反力（詳しくは、脚体の接地部に床から作用する力）と床反力作用点の位置とを逐次把握することが必要となる。この床反力および床反力作用点を把握することで、二足歩行移動体の脚体の関節に作用するモーメント等を把握することが可能となり、その把握されたモーメント等に基づいて歩行アシスト装置の目標補助力や、二足歩行ロボットの各関節の目標駆動トルク等を決定することが可能となる。

前記床反力を把握する手法としては、例えば特開 2000-249570 号公報に開示されているものが知られている。この技術では、二足歩行移動体の定常的な歩行時に各脚体の床反力の経時変化の波形が周期的に変化することから、各脚体の床反力を、歩行周期の $1/n$ ($n = 1, 2, \dots$) の互いに異なる周期を有する複数の三角関数の合成値（一次結合）として把握するものである。しかし、この技術では、床反力作用点の位

置を把握することはできず、二足歩行移動体の脚体の関節に作用するモーメントを把握するには不十分である。

また、床に設置したフォースプレート上で二足歩行移動体を歩行させ、該フォースプレートの出力により床反力および床反力作用点の位置を把握する手法も知られている（例えば特開 2001-29329 号公報を参照）。

しかし、この技術では、フォースプレートが設置された環境下でしか床反力および床反力作用点の位置を把握できず、通常の環境下での二足歩行移動体の歩行には適用できないという問題がある。

そこで、本願出願人は、先に、例えば特願 2002-18798 号（特開 10 2003-220584 号公報）にて、床反力作用点の位置をリアルタイムで推定できる手法を提案している。この手法は、各脚体の大腿部の傾斜角度、あるいは、膝関節の屈曲角度が各脚体の足首部に対する床反力作用点の位置（足首部を基準とした床反力作用点の位置ベクトル）との間に比較的高い相関性を有することを利用したものである。すなわち、この手法 15 では、大腿部の傾斜角度、あるいは、膝関節の屈曲角度と、床反力作用点の位置との相関関係を表す相関データ（例えばデータテーブルや演算式）があらかじめ作成されて記憶保持され、この相関データと、二足歩行移動体の歩行時に計測される大腿部の傾斜角度又は膝関節の屈曲角度とから、床反力作用点の位置が推定される。

しかしながら、本願発明者等のさらなる実験・検討によって、大腿部の傾斜角度、あるいは、膝関節の屈曲角度と、床反力作用点の位置との相関関係は、二足歩行移動体の歩行速度等の影響を受け、さらには、平地歩行、階段歩行、坂道歩行等、二足歩行移動体の運動形態の影響も受けることが判明した。このため、上記手法により、床反力作用点の位置 25 を適正に推定するためには、前記相関データを二足歩行移動体の歩行速度や運動形態の種別毎に複数種類用意して、記憶保持しておかなければ

ならず、その記憶保持のためにメモリの多くの容量を必要とするという不都合があった。また、運動形態が切り替わるときに、その切り替わり前後で各別の相関データに基づいて推定される床反力作用点の位置の不連続が生じやすく、ひいては、その床反力作用点の推定位置を用いて関節モーメントを推定したときに、該関節モーメントの推定値も不連続に変化してしまうという不都合もあった。

本発明はかかる背景に鑑みてなされたものであり、複数種類の相関データを用いることなく、床反力作用点の位置を比較的簡単な手法でリアルタイムに把握することができ、特に二足歩行移動体としての人間に係る床反力作用点の位置を把握する上で好適な床反力作用点推定方法を提供することを目的とする。

さらに、その床反力作用点の推定値を用いて脚体の膝関節等の関節に作用するモーメントをリアルタイムに把握することができる二足歩行移動体の関節モーメント推定方法を提供することを目的とする。

15

発明の開示

本願発明者等が種々様々な実験等により銳意努力して知見したところによれば、人間等の二足歩行移動体が例えば平地歩行を行っているとき、接地している各脚体の床反力作用点の水平方向位置は、二足歩行移動体の移動速度等によらずに、二足歩行移動体の重心の位置と該脚体の足首関節の位置と該脚体の足平部の中足趾節関節（足平部の親指の付け根の関節）の位置との相対的位置関係により概ね定まる。より具体的には、二足歩行移動体の進行方向で重心の位置が足首関節の位置よりも後側に在るか、中足趾節関節の位置よりも前側にあるか、足首関節の位置と中足趾節関節の位置との間にあるかで、それぞれ、床反力作用点の水平方向位置は、足首関節の水平方向位置、中足趾節関節の水平方向位置、重

心の水平方向位置とほぼ同等になる。従って、重心の位置と足首関節の位置と中足趾節関節の位置との相対的位置関係に応じて、それらの3つの位置のいずれかを床反力作用点の水平方向位置として推定することができる。また、接地している各脚体の床反力作用点の鉛直方向位置、特に足首関節に対する鉛直方向位置は、該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離により定まる。

そこで、本発明の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法、すなわち二足歩行移動体の各脚体毎の床反力作用点の位置を逐次推定する方法は、前記の目的を達成するために、少なくとも前記二足歩行移動体の平地歩行を含む運動中に、該二足歩行移動体の重心の位置と各脚体の足首関節の位置と該脚体の足平部の中足趾節関節の位置とをそれぞれ逐次把握すると共に、接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を逐次把握する第1ステップを備える。そして、前記運動中に接地している各脚体毎に、各脚体の床反力作用点の水平方向位置を、前記第1ステップで把握した前記重心の位置と該脚体の足首関節の位置と該脚体の中足趾節関節の位置との間の相対的位置関係に応じて逐次推定すると共に、該脚体の床反力作用点の鉛直方向位置を、前記第1ステップで把握した該脚体の足首関節から接地面までの前記鉛直方向距離だけ該足首関節から鉛直方向下方に離れた位置として逐次推定する第2ステップとを備える。

かかる本発明の床反力作用点推定方法によれば、二足歩行移動体の重心の位置と各脚体の足首関節の位置と該脚体の足平部の中足趾節関節の位置とを前記第1ステップで逐次把握しておくことで、それらの位置のいずれかを、それらの位置の相対的位置関係に応じて、接地している各脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定すればよい。このため、データテーブルやマップデータ等を使用することなく、床反力作用点の

水平方向位置を推定することができる。また、前記第1ステップで、接地している各脚体の足首関節から接地面（床面）までの鉛直方向距離を逐次把握しておくことで、その鉛直方向距離だけ足首関節から鉛直方向下方に離れた位置を床反力作用点の鉛直方向位置として推定すればよい。

5 このため、データテーブルやマップデータ等を使用することなく、床反力作用点の鉛直方向位置を推定することができる。

従って、本発明の床反力作用点推定方法によれば、複数種類の相関データを用いることなく、床反力作用点の位置を比較的簡単な手法でリアルタイムに把握することができる。

10 なお、本発明の床反力作用点推定方法で、前記重心の位置、足首関節の位置、および中足趾節関節の位置は、例えば上体の傾斜角度をジャイロセンサや加速度センサにより検出すると共に、各脚体の関節の屈曲角度をポテンショメータ等を用いて検出し、それらの検出した上体の傾斜角度および脚体の関節の屈曲角度と、二足移動体を剛体の連結体として
15 表現してなる剛体リンクモデルとを用いて把握することが可能である。

かかる本発明の床反力作用点推定方法では、前記したように二足歩行移動体の進行方向で重心の位置が足首関節の位置よりも後側に在るか、中足趾節関節の位置よりも前側にあるか、足首関節の位置と中足趾節関節の位置との間にあるかで、それぞれ床反力作用点の水平方向位置は、
20 足首関節の水平方向位置、中足趾節関節の水平方向位置、重心の水平方向位置とほぼ同等になる。従って、前記第2ステップで前記床反力作用点の水平方向位置を推定するとき、接地している各脚体毎に、前記重心の位置が該脚体の足首関節の位置よりも前記二足歩行移動体の進行方向で後側に存在するときには、該脚体の足首関節の水平方向位置を該脚体
25 の床反力作用点の水平方向位置として推定すればよい。また、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも前記二足歩行移動体の進行

方向で前側に存在するときには、該脚体の中足趾節関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定すればよい。また、前記重心の位置が前記二足移動体の進行方向で該脚体の足首関節の位置と中足趾節関節の位置との間に存在するときには、前記重心の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定すればよい。

これにより、重心の位置、足首関節の位置及び中足趾節関節位置の相対的位置関係の三種類の場合分けに応じて適切な床反力作用点の水平方向位置を推定することができる。そして、この場合、重心の位置は、足首関節の位置の前後、あるいは中足趾節関節の位置の前後で連続的に変化するので、床反力作用点の水平方向位置の推定値も連続的に変化させることができる。

また、本発明の床反力作用点推定方法では、床反力作用点の鉛直方向位置の推定に関しては、その推定の1つの手法として、例えば前記二足歩行移動体の直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離をあらかじめ計測して記憶保持しておく。そして、前記第1ステップで前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を把握するとき、前記記憶保持した鉛直方向距離を、前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握する。

すなわち、本願発明者等の知見によれば、接地している脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離は、一般に、二足歩行移動体の平地歩行等の運動中にさほど大きく変化することはなく、二足歩行移動体の直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離に概略的にはほぼ同等となる。従って、その直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離をあらかじめ計測して記憶保持しておき、その記憶保持した鉛直方向距離を、二足歩行移動体の運動

中に接地している脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握することで、簡単に床反力作用点の鉛直方向位置を推定できる。

さらにより精度よく、床反力作用点の鉛直方向位置を推定するためには、前記二足歩行移動体の直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離と該脚体の中足趾節関節から接地面までの鉛直方向距離とをそれぞれ第1基本鉛直方向距離及び第2基本鉛直方向距離としてあらかじめ計測して記憶保持しておくことが好ましい。そして、前記第1ステップで前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を把握するとき、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で後側に存在するときには、前記第1基本鉛直方向距離を該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握することが好ましい。また、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で前側に存在するときには、該脚体の足首関節と中足趾節関節との間の鉛直方向距離を求めた後、その求めた鉛直方向距離に前記第2基本鉛直方向距離を加えた値を該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握することが好ましい。

すなわち、前記重心の位置が脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で後側に存在するときには、該脚体の足平部は、少なくともその踵の底面を接地させているので、二足歩行移動体の運動中に接地している脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離は、前記第1基本鉛直方向距離にほぼ等しい。また、重心の位置が脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で前側に存在するときには、該脚体の足平部は、一般に踵を浮かせて、つま先側の箇所（中足趾節関節の近傍箇所）で接地させている。そして、この場合には、該脚体の足平関節から接地面までの鉛直方向距離は、該足平関節と中足趾節関

節との間の鉛直方向距離に、前記第2基本鉛直方向距離を加えた値にはほぼ等しい。そして、この場合、足平関節と中足趾節関節との間の鉛直方向距離は前記第1ステップで把握したそれらの関節の位置から求めることができる。

5 従って、重心の位置が脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で後側に存在するか前側に存在するかによって、上記の如く脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を把握することで、その把握する鉛直方向距離の精度を高めることができる。ひいては、床反力作用点の鉛直方向位置の推定値の精度をより高めることができる。

10 また、本発明の床反力作用点の推定方法では、少なくとも前記二足歩行移動体の平地歩行と該二足歩行移動体の階段又は坂道での歩行とを含む該二足歩行移動体の運動中に、前記第1ステップの処理を実行しつつ、該二足歩行移動体の運動形態を判断し、その判断した二足歩行移動体の運動形態が平地歩行であるときには、前記第2ステップの処理により、

15 接地している各脚体毎の床反力作用点の位置を逐次推定する。一方、前記判断した二足歩行移動体の運動形態が階段又は坂道での歩行であるときには、接地している各脚体毎に、各脚体の中足趾節関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として逐次推定すると共に、該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離だけ該足首関節から鉛

20 直方向下方に離れた位置を該脚体の床反力作用点の鉛直方向位置として逐次推定することが好ましい。

すなわち、本願発明者の知見によれば、人間等の二足歩行移動体が階段又は坂道で歩行を行っているときには、一般に、接地中の床反力作用点は、その接地中のほぼ全期間にわたって中足趾節関節の近傍付近に偏る傾向がある。従って、二足歩行移動体の運動形態が階段又は坂道の歩行であるときには、平地歩行の場合のように、重心の位置と足首関節の

位置と中足趾節関節の位置の相対的位置関係に応じて床反力作用点の水平方向位置を推定するのではなく、接地している脚体の中足趾節関節の水平方向位置を床反力作用点の水平方向位置として推定することが好ましい。これにより、階段又は坂道の歩行時における床反力作用点の水平方向位置を適正に推定できる。なお、この場合、床反力作用点の鉛直方向位置は、平地歩行の場合と同様に推定すればよい。

上記の如く、床反力作用点の水平方向位置の推定の仕方を平地歩行の運動形態と階段又は坂道での歩行の運動形態とで分ける場合において、前記二足歩行移動体の運動形態が、平地歩行であるか、階段又は坂道で10の歩行であるかは、少なくとも該二足歩行移動体の両脚体の足首関節の間の鉛直方向距離に基づき判断することができる。

すなわち、平地歩行では、両脚体が接地しているとき（両脚支持状態のとき）の両脚体の足首関節の間の鉛直方向距離は、ほぼ0近傍の値となるが、階段又は坂道の歩行では、両脚体が接地しているとき（両脚支持状態のとき）の両脚体の足首関節の間の鉛直方向距離は、比較的大きい値となる。従って、その両脚体の足首関節の鉛直方向距離に基づいて、二足歩行移動体の運動形態が平地歩行の運動形態であるか、階段又は坂道での歩行の運動形態であるかを適正に判断できる。

次に、本発明の二足歩行移動体の関節モーメント推定方法は、前述した本発明の床反力推定方法により逐次求めた床反力作用点の位置の推定値を用いて二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定する方法である。そして、この関節モーメント推定方法は、前記二足歩行移動体の接地している各脚体の床反力を少なくとも該二足歩行移動体の上体の所定部位の加速度を検出すべく該上体に装着25した加速度センサの検出出力と該上体の傾斜角度を検出すべく該上体に装着した上体傾斜センサの検出出力とを用いて逐次推定するステップと、

前記二足歩行移動体を複数の剛体の連結体として表してなる剛体リンクモデルの各剛体に対応する二足歩行移動体の各剛体相当部の傾斜角度、該剛体相当部の重心の加速度及び該剛体相当部の角加速度を少なくとも前記上体傾斜センサの検出出力と該二足歩行移動体の各脚体の関節の屈曲角度を検出すべく該関節に装着した角度センサの検出出力とを用いて逐次把握するステップとを備え、前記床反力の推定値と、前記床反力作用点の位置の推定値と、前記各剛体相当部の傾斜角度、該剛体相当部の重心の加速度及び該剛体相当部の角加速度と、各剛体相当部のあらかじめ求めた重量及びサイズと、各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置と、各剛体相当部のあらかじめ求めた慣性モーメントとを用いて逆動力学モデルに基づき前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定することを特徴とするものである。

かかる本発明の関節モーメント推定方法では、詳細は後述するが、二足歩行移動体の上体（胴体）の所定部位（例えば腰部）の加速度を加速度センサで逐次検出すると共に、上体の傾斜角度を上体傾斜センサで逐次検出すれば、それらの検出出力（検出値）を用いて、接地している各脚体に作用する床反力を逐次推定することができる。さらに、上体の傾斜角度を上体傾斜センサで検出することに加えて、各脚体の関節の屈曲角度を角度センサで逐次検出すれば、それらの上体傾斜センサ及び角度センサの検出出力（検出値）を用いて、二足歩行移動体を表す剛体リンクモデルの各剛体相当部（大腿部や下腿部等）の傾斜角度（これは各剛体相当部の相互の姿勢関係を表す）、該剛体相当部の重心の加速度および該剛体相当部の角加速度を逐次把握できる。すなわち、上体の傾斜角度と各脚体の関節の屈曲角度とがわかれれば、各剛体相当部の相互の姿勢関係がわかるので、各剛体相当部の傾斜角度がわかる。さらに各剛体相

当部における該剛体相当部の重心の位置（各剛体相当部に固定した座標系での該剛体相当部の重心の位置）はあらかじめ求めておくことができるので、これと各剛体相当部の相互の姿勢関係とから、二足歩行移動体の全体における（剛体リンクモデルの全体における）各剛体相当部の重心の位置（二足歩行移動体の任意の位置（例えば腰部）に定めた基準点に対する位置）が判る。そして、各剛体相当部の重心の位置の二階微分値として、該重心の加速度を把握できる。また、各剛体相当部の傾斜角度がわかれば、その二階微分値として各剛体相当部の角加速度を把握できる。

10 そして、上述のように二足歩行移動体の床反力を推定すると共に、各剛体相当部の傾斜角度、該剛体相当部の重心の加速度、および該剛体相当部の角加速度を把握したとき、前記床反力作用点推定方法により求められる床反力作用点の推定値と併せて、それらのデータと、各剛体相当部のあらかじめ求めた重量及びサイズ（特に長さ）と、各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置と、各剛体相当部のあらかじめ求めた慣性モーメントとを用いて、公知の所謂逆動力学モデルに基づいて各脚体の膝関節や股関節に作用するモーメントを推定することができる。この逆動力学モデルに基づく手法は、それを簡略的に言えば、二足歩行移動体の各剛体相当部の重心の並進運動に関する運動方程式と、該剛体相当部の回転運動（例えば該剛体相当部の重心の回りの回転運動）に関する運動方程式とを用いて剛体リンクモデルの各関節に相当する二足歩行移動体の各関節に作用するモーメントを床反力作用点により近いものから順番に求めていくものである。詳細は後述するが、例えば各脚体が大腿部及び下腿部をそれぞれ剛体相当部として有する連結体であるとした場合、各脚体の下腿部の重心の並進運動に関する運動方程式に、該下腿部の重心の加速度、該脚体に作用する床反力の推定値、

下腿部の重量の値を適用することで、該脚体の膝関節に作用する力（関節反力）が判る。さらに、該脚体の膝関節に作用する関節反力と、該脚体の下腿部の角加速度と、該脚体の床反力作用点の推定位置と、該脚体の床反力の推定値と、該下腿部における該下腿部の重心の位置及び該下腿部のサイズ（長さ）に係わるデータ値と、該下腿部の慣性モーメントの値と、該下腿部の傾斜角度の値とを該下腿部の回転運動に関する運動方程式に適用することで、該脚体の膝関節のモーメントを推定することができる。

また、各脚体の大腿部の重心の並進運動に関する運動方程式に、該大腿部の重心の加速度、該脚体の膝関節に作用する関節反力、大腿部の重量の値とを適用することで、該脚体の股関節に作用する関節反力が判る。さらに、該脚体の膝関節及び股関節にそれぞれ作用する関節反力と、該脚体の大腿部の角加速度と、該大腿部における該大腿部の重心の位置及び該大腿部のサイズ（長さ）に係わるデータ値と、該大腿部の慣性モーメントの値と、該大腿部の傾斜角度の値とを該大腿部の回転運動に関する運動方程式に適用することで、該脚体の股関節のモーメントを推定することができる。

かかる本発明の関節モーメント推定方法によれば、前述の本発明の床反力作用点推定方法により推定した床反力作用点の位置を用いて脚体の関節に作用するモーメントを推定することにより、多種類の相関データをあらかじめ用意したり、二足歩行移動体に比較的大型なセンサ等を装備したりすることなく、脚体の関節に作用するモーメントを比較的簡単な演算処理でリアルタイムに推定することができる。

25 図面の簡単な説明

図1（a）、（b）は、本発明の実施形態における床反力推定手法の基

本的原理を説明するための図、図2は本発明の実施形態における二足歩行移動体としての人間と該人間に装備する装置構成を模式化して示す図、図3は図2の装置に備える演算処理装置の機能を説明するためのプロック図、図4は図3の演算処理装置の処理に用いる剛体リンクモデルを示す図である。図5は本発明の第1実施形態における中足趾節関節の位置(水平方向位置)の算出手法と、足首関節から接地面までの距離を把握する手法とを説明するための図、図6(a)～(c)は平地歩行時における床反力作用点の水平方向位置の推定手法を説明するための図、図7は図3の演算処理装置の関節モーメント推定手段における処理を説明するための図である。図8および図9は、それぞれ本発明の第1実施形態により求められた平地歩行時の床反力作用点の水平方向位置、鉛直方向位置の経時変化の様子を例示するグラフ、図10および図11は、それぞれ本発明の第1実施形態により求められた平地歩行時の膝関節モーメント、股関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ、図12および図13は、それぞれ本発明の第1実施形態により求められた階段下り歩行時の膝関節モーメント、股関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ、図14および図15は、それぞれ本発明の第1実施形態により求められた階段登り歩行時の膝関節モーメント、股関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ、図16および図17は、それぞれ本発明の第1実施形態により求められた、椅子への座り動作時における膝関節モーメント、股関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ、図18および図19は、それぞれ本発明の第1実施形態により求められた、椅子への座り動作時における膝関節モーメント、股関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフである。図20は本発明の第2実施形態における中足趾節関節の位置の算出手法と、足首関節から接地面までの距離を把握する手法とを説明するための図である。

発明を実施するための最良の形態

以下に図面を参照しつつ、本発明の床反力作用点推定方法及び関節モーメント推定方法を適用した実施形態を説明する。まず、理解の便宜上、5 本発明の実施形態における二足歩行移動体の床反力推定手法の基本的な考え方を図1を参照して説明しておく。二足歩行移動体の脚体の運動状態、例えば歩行動作時の脚体の運動状態は、図1(a)に例示するように二足歩行移動体1の両脚体2, 2のうちの一方の脚体2(図では二足歩行移動体1の進行方向で前側の脚体)のみが接地する単脚支持状態と、10 図1(b)に示すように両脚体2, 2が接地する両脚支持状態とがある。

ここで、まず、前記単脚支持状態において、二足歩行移動体1が運動を行う床に対して固定された絶対座標系における該二足歩行移動体1の重心の運動方程式(詳しくは重心の並進運動に関する運動方程式)は、該重心の加速度と二足歩行移動体1の重量との積が、該重心に作用する15 重力(=二足歩行移動体1の重量×重力加速度)と、接地している脚体2の接地部に床から作用する床反力との合力に等しいという関係式になる。具体的には、例えば図1(a)に示すように、床Aに対して固定した絶対座標系C_fにおいて、二足歩行移動体1の重心G₀の加速度a_(ベクトル)のX軸方向(二足歩行移動体1の進行方向での水平方向)、20 Z軸方向(鉛直方向)の成分をそれぞれa_x, a_z、接地している脚体2(支持脚側の脚体2)に係る床反力F_(ベクトル)のX軸方向、Z軸方向の成分をそれぞれF_x, F_zとおくと、重心G₀の運動方程式は、次式(1)により表される。

$$^T(F_x, F_z - M \cdot g) = M \cdot ^T(a_x, a_z) \quad \dots \dots (1)$$

25 (但し、M:二足歩行移動体1の重量、g:重力加速度)

尚、式(1)中の両辺の括弧部分^T(,)は2成分のベクトルを

意味している。本明細書では $\tau(a_x, a_z)$ という形の表記は、ベクトルを表す。

従って、二足歩行移動体 1 の重心 G_0 の加速度 $a = \tau(a_x, a_z)$ を把握すれば、その加速度 a と、二足歩行移動体 1 の重量 M の値と、重力加速度 g の値とを用いて、次式 (2) により、床反力 $F = \tau(F_x, F_z)$ の推定値を得ることができることとなる。

$$\tau(F_x, F_z) = M \cdot \tau(a_x, a_z - g) \quad \dots \dots (2)$$

この場合、床反力 F の推定値を得るために必要な重量 M は、あらかじめ計測等により把握することができる。また、重心 G_0 の位置や加速度 a については、詳細は後述するが、二足歩行移動体 1 の各関節の屈曲角度（回転角度）を検出するセンサや、加速度センサ、ジャイロセンサ等のセンサの出力を用いて公知の手法等により逐次把握することが可能である。

また、前記両脚接地状態における二足歩行移動体 1 の重心の運動方程式（詳しくは重心の並進運動に関する運動方程式）は、該重心の加速度と二足歩行移動体 1 の重量との積が、該重心に作用する重力（=二足歩行移動体の重量×重力加速度）と、両脚体 2, 2 のそれぞれの接地部に床から作用する床反力（両脚体 2, 2 にそれぞれ対応する二つの床反力）との合力に等しいという関係式になる。具体的には、図 1 (b) に示すように二足歩行移動体 1 の進行方向に向かって前側の脚体 2 に係る床反力 F_f の X Z 座標成分を F_{fx}, F_{fz} 、後側の脚体 2 に係る床反力 F_r の X Z 座標成分を F_{rx}, F_{rz} とおくと、重心 G_0 の運動方程式は、次式 (3) により表される。

$$\tau(F_{fx} + F_{rx}, F_{fz} + F_{rz} - M \cdot g) = M \cdot \tau(a_x, a_z)$$

尚、式 (3) 中の a_x, a_z, M, g の意味は前述のとおりである。

一方、本願発明者等の知見によれば、両脚支持状態において、各脚体 2, 2 にそれぞれ係る床反力 F_f, F_r は、概ね、図 1 (b) に示すように、各脚体 2, 2 の下端部近傍の特定部位、例えば足首関節 $12f, 12r$ の部分から二足歩行移動体 1 の重心 G_0 に向かって作用するとみなすことができる。そして、このとき、前記重心 G_0 に対する各脚体 2, 2 の前記足首関節 $12f, 12r$ の位置と、各脚体 2, 2 に作用する床反力 F_f, F_r との間には一定の関係式、すなわち、前記重心 G_0 と各脚体 2, 2 の足首関節 $12f, 12r$ とを結ぶ線分の方向（該重心 G_0 に対する該足首関節 $12f, 12r$ の位置ベクトルの方向）が該脚体 2, 2 10 に係る床反力 F_f, F_r の方向に等しいという関係を表す関係式が成立する。

具体的には、図 1 (b) を参照して、前記絶対座標系 C_f における重心 G_0 の位置の座標を (X_g, Z_g) 、前側脚体 2 の足首関節 $12f$ の位置の座標を (X_f, Z_f) 、後側脚体 2 の足首関節 $12r$ の位置の座標を (X_r, Z_r) とおくと、上記の関係式は次式 (4) となる。

$$(Z_f - Z_g) / (X_f - X_g) = F_{fz} / F_{fx}$$

$$(Z_r - Z_g) / (X_r - X_g) = F_{rz} / F_{rx}$$

…… (4)

そして、この式 (4) と前記式 (3) とから次式 (5) が得られる。

$$20 \quad F_{fx} = M \cdot \{ \Delta X_f \cdot (\Delta Z_r \cdot a_x - \Delta X_r \cdot a_z - \Delta X_r \cdot g) \} / (\Delta X_f \cdot \Delta Z_r - \Delta X_r \cdot \Delta Z_f)$$

$$F_{fz} = M \cdot \{ \Delta Z_f \cdot (\Delta Z_r \cdot a_x - \Delta X_r \cdot a_z - \Delta X_r \cdot g) \} / (\Delta X_f \cdot \Delta Z_r - \Delta X_r \cdot \Delta Z_f)$$

$$F_{rx} = M \cdot \{ \Delta X_r \cdot (-\Delta Z_f \cdot a_x + \Delta X_f \cdot a_z + \Delta X_f \cdot g) \} / (\Delta X_f \cdot \Delta Z_r - \Delta X_r \cdot \Delta Z_f)$$

$$25 \quad F_{rz} = M \cdot \{ \Delta Z_r \cdot (-\Delta Z_f \cdot a_x + \Delta X_f \cdot a_z)$$

$$+ \Delta X_f \cdot g) \} / (\Delta X_f \cdot \Delta Z_r - \Delta X_r \cdot \Delta Z_f)$$

…… (5)

(但し、 $\Delta X_f = X_f - X_g$, $\Delta Z_f = Z_f - Z_g$,

$$\Delta X_r = X_r - X_g, \Delta Z_r = Z_r - Z_g)$$

5 従って、二足歩行移動体1の重心G0の加速度 $a = {}^T(a_x, a_z)$ を把握するとと共に、二足歩行移動体1の重心G0に対する各脚体2, 2のそれぞれの足首関節12f, 12rの位置（これは式（5）では ΔX_f , ΔZ_f , ΔX_r , ΔZ_r により表される）を把握すれば、その加速度 a 及び足首関節12f, 12rの位置と、二足歩行移動体1の重量Mの値と、
10 重力加速度gの値とを用いて、前記式（5）により、各脚体2毎の床反力 $F_f = {}^T(F_{fx}, F_{fz})$, $F_r = {}^T(F_{rx}, F_{rz})$ の推定値を得ることができる
こととなる。

この場合、床反力 F_f , F_r の推定値を得るために必要な重量Mは、
あらかじめ計測等により把握することができる。また、重心G0の加速度 a や重心G0の位置、該重心G0に対する前記足首関節12f, 12rの位置については、詳細は後述するが、二足歩行移動体1の各関節の屈曲角度（回転角度）を検出するセンサや、加速度センサ、ジャイロセンサ等のセンサの出力を用いて、公知の手法等により逐次把握する
15 こと可能である。

20 以下に説明する実施形態（第1および第2実施形態）は、上記に説明した事項を基礎として各脚体2の床反力を推定しつつ、各脚体2の床反力作用点および関節モーメントを推定するものである。

以下に、二足歩行移動体としての人間に本発明を適用した第1実施形態について詳説する。

25 図2に模式化して示すように、人間1は、その構成を大別すると、左右一対の脚体2, 2と、腰部3及び胸部4からなる胴体5と、頭部6と、

左右一対の腕体 7, 7 を有する。胴体 5 は、その腰部 3 が脚体 2, 2 のそれぞれに左右一対の股関節 8, 8 を介して連結され、両脚体 2, 2 上に支持されている。また、胴体 5 の胸部 4 は、腰部 3 の上側に該腰部 3 に対して人間 1 の前方側に傾斜可能に存している。そして、この胸部 5 4 の上部の左右両側部から腕体 7, 7 が延設され、該胸部 4 の上端部に頭部 6 が支持されている。

各脚体 2 は、股関節 8 から延在する大腿部 9 と、該大腿部 9 の先端から膝関節 10 を介して延在する下腿部 11 とを有し、下腿部 11 の先端部に、足首関節 12 を介して足平部 13 が連結されている。

10 本実施形態では、このような構成を有する人間 1 の各脚体 2 に作用する床反力及びその作用点の推定、さらには膝関節 10 及び股関節 8 に作用するモーメントの推定を行うために、次のような装置を人間 1 に装備している。

すなわち、胴体 5 の胸部 4 には、胸部 4 の傾斜に伴う角速度に応じた出力を発生するジャイロセンサ 14 (以下、胸部ジャイロセンサ 14 という) と、胸部 4 の前後方向の加速度に応じた出力を発生する加速度センサ 15 (以下、胸部前後加速度センサ 15 という) と、CPU、RAM、ROM 等から構成される演算処理装置 16 と、該演算処理装置 16 等の電源となるバッテリ 17 とが装着されている。これらの胸部ジャイロセンサ 14、胸部前後加速度センサ 15、演算処理装置 16 及びバッテリ 17 は、例えば胸部 4 に図示しないベルト等を介して固定されるショルダーバッグ状の収容部材 18 に収容され、該収容部材 18 を介して胸部 4 に一体的に固定されている。

尚、胸部前後加速度センサ 15 の出力が表す加速度は、より詳しくは、25 胸部 4 の水平断面方向 (胸部 4 の軸心と直交する方向) での前後方向の加速度であり、人間 1 が平地に直立姿勢で起立した状態では、前後水平

方向（図2の絶対座標系C_fのX軸方向）での加速度であるが、腰部3あるいは胸部4が鉛直方向（図2の絶対座標系C_fのZ軸方向）から傾斜した状態では、胸部4の鉛直方向に対する傾斜角度分だけ水平方向に對して傾斜した方向での加速度となる。

5 また、胴体5の腰部3には、腰部3の傾斜に伴う角速度に応じた出力を発生するジャイロセンサ19（以下、腰部ジャイロセンサ19という）と、腰部3の前後方向の加速度に応じた出力を発生する加速度センサ20（以下、腰部前後加速度センサ20という）と、腰部3の上下方向の加速度に応じた出力を発生する加速度センサ21（以下、腰部上下加速度センサ21という）とが、図示しないベルト等の固定手段を介して一体的に装着・固定されている。

ここで、腰部前後加速度センサ20は、より詳しくは胸部前後加速度センサ15と同様、腰部3の水平断面方向（腰部3の軸心と直交する方向）での前後方向の加速度を検出するセンサである。また、腰部上下加速度センサ21は、より詳しくは、腰部3の軸心方向での上下方向の加速度（これは腰部前後加速度センサ20が検出する加速度と直交する）を検出するセンサである。尚、腰部前後加速度センサ20及び腰部上下加速度センサ21は、二軸型の加速度センサにより一体的に構成されたものであってもよい。

20 さらに各脚体2の股関節8と膝関節10とには、それぞれの屈曲角度 $\Delta\theta_c$ 、 $\Delta\theta_d$ に応じた出力を発生する股関節角度センサ22および膝関節角度センサ23が装着されている。尚、股関節角度センサ22については、図2では手前側（人間1の前方に向かって右側）の脚体2の股関節8に係わる股関節角度センサ22のみが図示されているが、他方側25（人間1の前方に向かって左側）の脚体2の股関節8には、手前側の股関節角度センサ22と同心に、股関節角度センサ22が装着されている。

これらの角度センサ 22, 23 は、例えばポテンショメータにより構成されたものであり、各脚体 2 に図示しないバンド部材等の手段を介して装着されている。ここで、本実施形態の例では、各股関節角度センサ 22 が検出する屈曲角度 $\Delta\theta_c$ は、より詳しくは、腰部 3 と各脚体 2 の大腿部 9 との姿勢関係が所定の姿勢関係（例えば人間 1 の直立停止状態のように腰部 3 の軸心と大腿部 9 の軸心とがほぼ平行となる姿勢関係）にあるときを基準とした、腰部 3 に対する各脚体 2 の大腿部 9 の股関節 8 回り（人間 1 の左右方向における股関節 8 の軸心回り）の回転角度である。同様に、各膝関節角度センサ 23 が検出する屈曲角度 $\Delta\theta_d$ は、各脚体 2 の大腿部 9 と下腿部 11 との姿勢関係が所定の姿勢関係（例えば大腿部 9 の軸心と下腿部 11 の軸心とがほぼ平行となる姿勢関係）にあるときを基準とした、大腿部 9 に対する下腿部 11 の膝関節 10 回り（人間 1 の左右方向における膝関節 10 の軸心回り）の回転角度である。大腿部 9 の軸心は、該大腿部 9 の一端の関節（股関節 8）の中心と他端の関節（膝関節 10）の中心を結ぶ直線である。同様に、下腿部 11 の軸心はその両端の関節（膝関節 10 および足首関節 12）のそれぞれの中心を結ぶ直線である。

尚、前記各センサ 14, 15, 19~23 は、それらの出力を演算処理装置 16 に入力すべく、図示を省略する信号線を介して演算処理装置 16 に接続されている。また、本発明の関節モーメント推定方法に対応させていえば、センサ 14, 15, 19, 20 は、二足歩行移動体としての人間 1 の上体の傾斜角度を検出するための上体傾斜センサとしての意味をもち、センサ 20, 21 は、人間 1（二足歩行移動体）の所定部位としての腰部 3 の加速度を検出するためのセンサとしての意味をもつ。また、図 2 中、括弧付きの参照符号 24 を付して示したものは、各脚体 2 の足首関節 12 の屈曲角度に応じた信号を出力する足首関節角度セ

ンサであるが、これは、後述する第2実施形態に係わるものである。本実施形態（第1実施形態）では、足首関節角度センサ24は不要であり、実際には備えられていない。

前記演算処理装置16は、図3に示すような機能的手段を備えている。

5 なお、図3中、括弧を付した部分（足首関節角度センサ24の部分）と二点鎖線部分は、後述の第2実施形態に関するものであり、本実施形態では、これらの括弧付き部分および二点鎖線部分は不要である。従って、本実施形態における以下の演算処理装置16の説明では、これらの括弧付き部分および二点鎖線部分に関する事項については言及しない。

10 図3に示すように、本実施形態における演算処理装置16は、腰部上下加速度センサ21の検出データと、後述する床反力推定手段38により求められた各脚体2の床反力の推定値のデータとを用いて、人間1の脚体2、2の運動状態が単脚支持状態（図1（a）の状態）であるか、両脚支持状態（図1（b）の状態）であるかを判断する脚体運動判断手段25を備えている。また、演算処理装置16は、胸部前後加速度センサ15及び胸部ジャイロセンサ14の検出データを用いて、胸部4の絶対座標系Cfにおける傾斜角度θa（具体的には鉛直方向に対する傾斜角度θa。図2参照）を計測する胸部傾斜角度計測手段26と、腰部前後加速度センサ20及び腰部ジャイロセンサ19の検出データを用いて、15 腰部3の絶対座標系Cfにおける傾斜角度θb（具体的には鉛直方向に対する傾斜角度θb。図2参照）を計測する腰部傾斜角度計測手段27とを備えている。

20

さらに、演算処理装置16は、腰部前後加速度センサ20及び腰部上下加速度センサ21の検出データと前記腰部傾斜角度計測手段27により計測された腰部3の傾斜角度θbのデータとを用いて、本実施形態における人間1の基準点として図2に示すように腰部3に設定される身体

座標系 C_p (図 2 の x z 座標系) の原点 O の絶対座標系 C_f における加速度 (並進加速度) $a_0 = {}^T(a_{0x}, a_{0z})$ を求める基準加速度計測手段 2 8 を備えている。ここで、身体座標系 C_p は、より詳しくは、例えば人間 1 の左右の股関節 8, 8 のそれぞれの中心を結ぶ線の中点を原点 O とし、鉛直方向を z 軸方向、人間 1 の前方に向かう水平方向を x 軸方向とした座標系であり、3 軸の方向は前記絶対座標系 C_f と同一である。
5

また、演算処理装置 1 6 は、各脚体 2 の股関節角度センサ 2 2 及び膝関節角度センサ 2 3 の検出データと、前記腰部傾斜角度計測手段 2 7 による腰部 3 の傾斜角度 θ_b のデータとを用いて、絶対座標系 C_f における各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 1 1 のそれぞれの傾斜角度 θ_c, θ_d (具体的には鉛直方向に対する傾斜角度 θ_c, θ_d 。図 2 参照) 求める脚体姿勢算出手段 2 9 を備えている。

また、演算処理装置 1 6 は、前記胸部傾斜角度計測手段 2 6、腰部傾斜角度計測手段 2 7 及び脚体姿勢算出手段 2 9 により得られる胸部 4 の傾斜角度 θ_a 、腰部 3 の傾斜角度 θ_b 、並びに各脚体 2 の大腿部 9 の傾斜角度 θ_c 及び下腿部 1 1 の傾斜角度 θ_d のデータを用いて、後述の剛体リンクモデルに対応する人間 1 の各剛体相当部の重心の位置 (詳しくは前記身体座標系 C_p における各剛体相当部の重心の位置) を求める各部重心位置算出手段 3 0 と、その各剛体相当部の重心の位置のデータを用いて、上記身体座標系 C_p における人間 1 の全体の重心の位置を求める身体重心位置算出手段 3 1 と、前記脚体姿勢算出手段 2 9 により得られる各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 1 1 のそれぞれの傾斜角度 θ_c, θ_d のデータを用いて各脚体 2 の足首関節 1 2 の身体座標系 C_p における位置を求めると共に、さらに身体重心位置算出手段 3 1 により得られる人間 1 の全体の重心 G_0 (図 1 参照。以下、身体重心 G_0 という) の位置のデータを用いて該脚体 2 の足首関節 1 2 の身体重心 G_0 に対する位
20
25

置（詳しくは、前記式（5）における ΔX_f , ΔZ_f , ΔX_r , ΔZ_r ）を求める足首位置算出手段32と、足首位置算出手段32により得られた足首関節12の位置（身体座標系 C_p における位置）のデータを用いて各脚体2の足平部13の中足趾節関節13a（図2に黒点で示す。以下、5 MP関節13aという）の身体座標系 C_p における位置（詳しくはx軸方向位置）を求めるMP位置算出手段33と、前記身体重心位置算出手段31により得られた身体重心 G_0 の位置のデータと前記基準加速度計測手段28により得られた身体座標系 C_p の原点Oの加速度 a_0 のデータと用いて絶対座標系 C_f における身体重心 G_0 の加速度 $a = \tau(a_x, 10 a_z)$ （図1参照）を求める身体重心加速度算出手段34とを備えている。

なお、前記MP関節13aは、より詳しくは足平部13の親指の付け根の関節である。

さらに、演算処理装置16は、前記各部重心位置算出手段30により得られた人間1の各剛体相当部の重心の位置（詳しくは脚体2に係わる15 剛体相当部の重心の位置）のデータと前記基準加速度計測手段28により得られた身体座標系 C_p の原点Oの加速度 a_0 のデータと用いて絶対座標系 C_f における各脚体2の大腿部9及び下腿部11のそれぞれの重心の加速度（並進加速度）を求める脚体各部加速度算出手段35と、前記脚体姿勢算出手段29により得られた各脚体2の大腿部9及び下腿20 部11のそれぞれの傾斜角度 θ_c , θ_d のデータを用いて絶対座標系 C_f における各脚体2, 2の大腿部9及び下腿部11の角加速度を求める脚体各部角加速度算出手段36と、前記足首位置算出手段32で求められた各脚体2の足首関節12の身体座標系 C_p における位置のデータや脚体運動判断手段25の判断結果のデータに基づいて人間1の運動形態を25 判断する運動形態判断手段37と、前記身体重心位置算出手段31、足首位置算出手段32およびMP位置算出手段33でそれぞれ求めた身体

重心 G_0 、足首関節 1_2 及び M_P 関節 $1_3 a$ の位置（身体座標系 C_p での位置）や運動形態判断手段 3_7 が判断した運動形態に基づいて接地している各脚体 2 の床反力作用点の位置を推定する床反力作用点推定手段 3_8 とを備えている。なお、本実施形態で前記運動形態判断手段 3_7 が 5 判断する運動形態は、例えば人間 1 が平地歩行を行う運動形態、人間 1 が階段もしくは坂道で歩行（昇降）する運動形態、人間 1 が椅子に座つたり、椅子から立ち上がる動作の運動形態である。

また、演算処理装置 1_6 は、前記身体重心加速度算出手段 3_4 により求めた身体重心の加速度 a のデータと前記足首位置算出手段 3_2 により求めた各脚体 2 の足首関節 1_2 の身体重心 G_0 に対する位置のデータと前記脚体運動判断手段 2_5 による脚体 2 の運動状態の判断結果のデータとを用いて各脚体 2 に作用する床反力の推定値を求める床反力推定手段 3_9 と、この床反力の推定値のデータと脚体各部加速度算出手段 3_5 により得られた各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 1_1 の重心の加速度のデータと脚体各部角加速度算出手段 3_6 により得られた各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 1_1 の角加速度のデータと床反力作用点推定手段 3_8 により得られた床反力作用点の推定位置のデータと前記脚体姿勢算出手段 2_9 により得られた各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 1_1 のそれぞれの傾斜角度 θ_c 、 θ_d のデータとを用いて各脚体 2 の膝関節 1_0 及び股関節 8 に 15 それぞれ作用するモーメントを推定する関節モーメント推定手段 4_0 と 20 を備えている。

次に、上述の演算処理装置 1_6 の各手段のより詳細な処理内容と併せて、本実施形態の作動を説明する。

本実施形態では、例えば人間 1 が歩行等の脚体 2 の運動を行うに際して、両脚体 2 、 2 を着床させた状態（両足平部 1_3 、 1_3 を接地させた状態）で演算処理装置 1_6 の図示しない電源スイッチを投入すると、該 25

演算処理装置 16 による処理が所定のサイクルタイム毎に以下に説明するように逐次実行され、各脚体 2 に作用する床反力の推定値等が逐次求められる。

すなわち、まず、演算処理装置 16 は、前記脚体運動判断手段 25 の 5 処理を実行する。この脚体運動判断手段 25 の処理では、前記サイクル タイム毎に、前記腰部上下加速度センサ 21 により得られる腰部 3 の上 向き方向の加速度の検出データがあらかじめ定めた所定の閾値と比較さ れる。そして、該加速度の検出値がその閾値を超えたときに、前記図 1 (b) に示したような両脚支持状態が開始し、且つ、前記図 1 (a) に 10 示したような単脚支持状態が終了したと判断される。すなわち、人間 1 の歩行時に、単脚支持状態から両脚支持状態への移行の際には、遊脚側 の脚体 2 が着床（接地）することで、股関節 8 の近傍の腰部 3 には、ほ ぼ上向きに比較的大きな加速度（通常的な単脚支持状態では発生し得な い加速度）が発生する。このため、前記脚体運動判断手段 25 は、上記 15 のように腰部上下加速度センサ 21 による腰部 3 の上向き方向の加速度 の検出データを所定の閾値と比較することで、両脚支持状態の開始及び 単脚支持状態の終了（換言すれば遊脚側の脚体 2 の接地が行われたこ と）を判断する。

また、脚体運動判断手段 25 の処理では、両脚支持状態で床反力推定 20 手段 39 により後述するように求められた両脚体 2, 2 のそれぞれに作 用する床反力 F_f , F_r （図 1 (b) 参照）の推定値のうち、人間の進行 方向に対して後側の脚体 2 に係る床反力 $F_r = \sqrt{(F_{rx}^2 + F_{rz}^2)}$ の推定値 25 （詳しくは演算処理装置 16 の前回のサイクルタイムで求められた床反 力 F_r の絶対値 = $\sqrt{(F_{rx}^2 + F_{rz}^2)}$ ）があらかじめ定めた所定の閾値（略 「0」の正の値）と比較される。そして、該床反力 F_r の推定値の絶対 値がその閾値以下に低下したときに、両脚支持状態が終了し、且つ単脚

支持状態が開始した（換言すれば後側の脚体2が離床した）と判断される。尚、本実施形態では、脚体2の運動状態の初期状態は、両脚支持状態であり、いずれか一方の脚体2に係る床反力の推定値が上記閾値以下に低下するまでは、脚体運動判断手段25は、脚体2の運動状態が両支持状態であると判断する。

なお、両脚支持状態であるか単脚支持状態であるかの判断は、各脚体2の足平部13の底面（具体的には靴底等）に接地センサを装着しておき、その接地センサにより各脚体2の足平部13の接地の有無を検出することで、判断するようにしてもよい。あるいは、各脚体2の下腿部11に加速度センサを装着しておき、その加速度センサの検出出力に基づいて各脚体2の接地の有無を判断したり、各脚体2の下腿部11と床面との距離を赤外線測距センサ等を用いて計測し、その計測値に基づいて各脚体2の接地の有無を判断するようにすることも可能である。

上述のような脚体運動判断手段25の処理と並行して、演算処理装置16は、前記胸部傾斜角度計測手段26及び腰部傾斜角度計測手段27による処理を実行する。この場合、胸部傾斜角度計測手段26の処理では、胸部前後加速度センサ15及び胸部ジャイロセンサ14からそれぞれ入力される胸部4の前後方向の加速度、胸部4の角速度の検出データから、所謂カルマンフィルタの処理を用いた公知の手法により、絶対座標系Cfにおける胸部4の傾斜角度 θ_a が前記サイクルタイム毎に逐次求められる。同様に、腰部傾斜角度計測手段27の処理では、腰部前後加速度センサ20及び腰部ジャイロセンサ19からそれぞれ入力される腰部3の前後方向の加速度、腰部3の角速度の検出データから、カルマンフィルタの処理を用いて絶対座標系Cfにおける腰部3の傾斜角度 θ_b が逐次求められる。ここで、絶対座標系Cfにおける胸部4及び腰部3のそれぞれの傾斜角度 θ_a 、 θ_b は、本実施形態では例えば鉛直方向

(重力方向) に対する傾斜角度である。

尚、例えばジャイロセンサ 14, 19 による角速度の検出データを積分することで、胸部 4 や腰部 3 の傾斜角度を求めることが可能であるが、本実施形態のようにカルマンフィルタの処理を用いることで、胸部 4 や 5 腰部 3 の傾斜角度 θ_a , θ_b を精度よく計測することができる。

次に、演算処理装置 16 は、前記脚体姿勢算出手段 29 の処理と前記基準加速度計測手段 28 の処理とを実行する。

前記脚体姿勢算出手段 29 による処理では、各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 の傾斜角度 θ_c , θ_d (鉛直方向に対する傾斜角度。図 2 参照) が前記サイクルタイム毎に次のように求められる。すなわち、各脚体 2 の大腿部 9 の傾斜角度 θ_c は、その脚体 2 に装着されている前記股関節角度センサ 22 により得られる股関節 8 の屈曲角度 $\Delta\theta_c$ の検出データの今回値と、前記腰部傾斜角度計測手段 27 により求められた腰部 3 の傾斜角度 θ_b の今回値とから次式 (6) により算出される。

$$15 \quad \theta_c = \theta_b + \Delta\theta_c \quad \dots \dots (6)$$

ここで、腰部 3 の傾斜角度 θ_b は、該腰部 3 の上端部が下端部よりも人間 1 の前方側に突き出るように該腰部 3 が鉛直方向に対して傾斜している場合に負の値となるものであり、股関節 8 の屈曲角度 $\Delta\theta_c$ は、大腿部 9 の下端部が人間 1 の前方側に突き出るように大腿部 9 が腰部 3 の軸心に対して傾斜している場合に正の値となるものである。

さらに、各脚体 2 の下腿部 11 の傾斜角度 θ_d は、上記のように求められた大腿部 9 の傾斜角度 θ_c の今回値と、該脚体 2 に装着されている前記膝関節角度センサ 23 により得られる膝関節 10 の屈曲角度 $\Delta\theta_d$ の検出データの今回値とから次式 (7) により算出される。

$$25 \quad \theta_d = \theta_c - \Delta\theta_d \quad \dots \dots (7)$$

ここで、膝関節 10 の屈曲角度は、下腿部 11 が大腿部 9 の軸心に対

して該大腿部 9 の背面側に傾斜している場合に正の値となるものである。

また、前記基準加速度計測手段 28 の処理では、前記身体座標系 Cp の原点Oの絶対座標系 Cf における加速度 $a_0 = {}^T(a_{0x}, a_{0z})$ が次のように求められる。すなわち、前記腰部前後加速度センサ 20 から得られる 5 腰部 3 の前後方向の加速度の検出データの今回値を a_p 、前記腰部上下加速度センサ 21 から得られる腰部 3 の上下方向の加速度の検出データの今回値を a_q とすると、それらの検出データ a_p, a_q と、前記腰部傾斜角度計測手段 27 により求められた腰部 3 の傾斜角度 θ_b の今回値とか 10 ら、次式 (8) により絶対座標系 Cf における加速度 $a_0 = {}^T(a_{0x}, a_{0z})$ が求められる。

$$\begin{aligned}
 a_0 &= {}^T(a_{0x}, a_{0z}) \\
 &= {}^T(a_p \cdot \cos \theta_b - a_q \cdot \sin \theta_b, a_p \cdot \sin \theta_b + a_q \cdot \cos \theta_b - g) \\
 &\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

次に、演算処理装置 16 は、前記各部重心位置算出手段 30 の処理を 15 実行し、以下に説明する剛体リンクモデルを用いて、前記身体座標系 Cp における人間 1 の各剛体相当部の重心の位置（身体座標系 Cp の原点に対する位置）を求める。

図 4 に示すように、本実施形態で用いる剛体リンクモデル R は、人間 1 を、各脚体 2 の大腿部 9 に相当する剛体 R1, R1 と、下腿部 11 に相 20 当する剛体 R2, R2 と、腰部 3 に相当する剛体 R3 と、前記胸部 4、腕体 7, 7 及び頭部 6 を合わせた部分 38 (以下、上体部 38 という) に相当する剛体 R4 とを連結してなるものとして表現するモデルである。この場合、各剛体 R1 と剛体 R3 との連結部、並びに、各剛体 R1 と剛体 R2 との連結部がそれぞれ股関節 8、膝関節 10 に相当する。また、 25 剛体 R3 と剛体 R4 との連結部は腰部 3 に対する胸部 4 の傾動支点部 3 9 である。

そして、本実施形態では、このような剛体リンクモデルRの各剛体R1～R4に対応する人間1の剛体相当部（各脚体2の大腿部9及び下腿部11、腰部3、上体部38）のそれぞれの重心G1、G2、G3、G4の各剛体相当部における位置があらかじめ求められ、演算処理装置16の

5 図示しないメモリに記憶されている。

ここで、演算処理装置16に記憶保持している各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置は、各剛体相当部に対して固定した座標系での位置である。この場合、各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置を表すデータとして、例えば、各剛体相当部の一端部の関節の中心点

10 から該剛体相当部の軸心方向の距離が用いられる。具体的には、例えば図4に示すように、各大腿部9の重心G1の位置は、該大腿部9の股関節8の中心から大腿部9の軸心方向に距離t1の位置、各下腿部11の重心G2の位置は、該下腿部11の膝関節10の中心から下腿部11の軸心方向に距離t2の位置として表され、それらの距離t1、t2の値があ

15 らかじめ求められて演算処理装置16に記憶保持されている。他の剛体相当部の重心G3、G4の位置についても同様である。

尚、上体部38の重心G4の位置は、厳密には、該上体部38に含まれる腕体7、7の動きの影響を受けるが、歩行時における各腕体7、7は、一般に胸部4の軸心に対して対称的な位置関係になるので、上体部

20 38の重心G4の位置はさほど変動せず、例えば直立停止状態における上体部38の重心G4の位置とほぼ同一となる。

また、本実施形態では、各剛体相当部（各脚体2の大腿部9及び下腿部11、腰部3、上体部38）の重心G1、G2、G3、G4の位置を表すデータの他、各剛体相当部の重量のデータや、各剛体相当部のサイズの

25 データ（例えば各剛体相当部の長さのデータ）があらかじめ求められて、演算処理装置16に記憶保持されている。

尚、下腿部 11 の重量は、足平部 13 を含めた重量である。また、上述のように演算処理装置 16 にあらかじめ記憶保持したデータは、実測等により求めておいてもよいが、人間 1 の身長や体重から、人間の平均的な統計データに基づいて推測するようにしてもよい。一般に、上記各 5 剛体相当部の重心 G1、G2、G3、G4 の位置や、重量、サイズは、人間の身長や体重と相関性があり、その相関関係に基づいて、人間の身長及び体重のデータから、上記各剛体相当部の重心 G1、G2、G3、G4 の位置や、重量、サイズを比較的精度よく推測することが可能である。

前記各部重心位置算出手段 30 は、上述のように演算処理装置 16 に 10 あらかじめ記憶保持したデータと、前記胸部傾斜角度計測手段 26 及び腰部傾斜角度計測手段 27 によりそれぞれ求められた胸部 4 の傾斜角度 θ_a (=上体部 38 の傾斜角度) 及び腰部 3 の傾斜角度 θ_b の今回値と、前記脚体姿勢算出手段 29 により求められた各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの傾斜角度 θ_c 、 θ_d の今回値とから、腰部 3 に固定された原点 O を有する身体座標系 Cp (図 4 の x z 座標系) での各剛 15 体相当部の重心 G1、G2、G3、G4 の位置を求める。

この場合、各剛体相当部 (各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11、腰部 3、上体部 38) の傾斜角度 θ_a ~ θ_d が上述のように求められているので、その傾斜角度 θ_a ~ θ_d のデータと、各剛体相当部のサイズのデータ 20 とから身体座標系 Cp における各剛体相当部の位置及び姿勢が判る。従って、身体座標系 Cp における各剛体相当部の重心 G1、G2、G3、G4 の位置が求められることとなる。

具体的には、例えば図 4 を参照して、同図 4 の左側に位置する脚体 2 に関し、大腿部 9 の身体座標系 Cp における傾斜角度 (z 軸方向に対する傾斜角度) は θ_c (この場合、図 4 では $\theta_c < 0$ である) であるので、身体座標系 Cp における大腿部 9 の重心 G1 の位置の座標は、($t_1 \cdot \sin$

$\theta_c, -t_1 \cdot \cos \theta_c$ となる。また、下腿部 1 1 の身体座標系 C_p における傾斜角度は θ_d (図 4 では $\theta_d < 0$) であるので、身体座標系 C_p における下腿部 1 1 の重心 G_2 の位置の座標は、大腿部 9 の長さを L_c とすると、 $(L_c \cdot \sin \theta_c + t_2 \cdot \sin \theta_d, -L_c \cdot \cos \theta_c - t_2 \cdot \cos \theta_d)$ となる。他の脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 1 1 並びに、腰部 3 及び上体部 3 8 の重心についても上記と同様に求められる。

このようにして、各部重心位置算出手段 3 0 により、身体座標系 C_p における各剛体相当部の重心 G_1, G_2, G_3, G_4 の位置を求めた後、演算処理装置 1 6 は、前記身体重心位置算出手段 3 1 の処理実行し、各剛体相当部の重心 G_1, G_2, G_3, G_4 の位置のデータと、各剛体相当部の重量のデータとを用いて身体座標系 C_p における人間 1 の身体重心 G_0 の位置 (x_g, z_g) を求める。

ここで、身体座標系 C_p における腰部 3 の重心 G_3 の位置及び重量をそれぞれ (x_3, z_3)、 m_3 、上体部 3 8 の重心 G_4 の位置及び重量をそれぞれ (x_4, z_4)、 m_4 、人間 1 の前方に向かって左側の脚体 2 の大腿部 9 の重心 G_1 の位置及び重量をそれぞれ (x_{1L}, z_{1L})、 m_{1L} 、同脚体 2 の下腿部 1 1 の重心 G_2 の位置及び重量をそれぞれ (x_{2L}, z_{2L})、 m_{2L} 、右側の脚体 2 の大腿部 9 の重心 G_1 の位置及び重量をそれぞれ (x_{1R}, z_{1R})、 m_{1R} 、同脚体 2 の下腿部 1 1 の重心 G_2 の位置及び重量をそれぞれ (x_{2R}, z_{2R})、 m_{2R} 、人間 1 の体重を M ($= m_{1L} + m_{2L} + m_{1R} + m_{2R} + m_3 + m_4$) とすると、身体座標系 C_p における人間 1 の身体重心 G_0 の位置 (x_g, z_g) は次式 (9) により求められる。

$$x_g = (m_{1L} \cdot x_{1L} + m_{1R} \cdot x_{1R} + m_{2L} \cdot x_{2L} + m_{2R} \cdot x_{2R} + m_3 \cdot x_3 + m_4 \cdot x_4) / M$$

$$z_g = (m_{1L} \cdot z_{1L} + m_{1R} \cdot z_{1R} + m_{2L} \cdot z_{2L} + m_{2R} \cdot z_{2R} + m_3 \cdot z_3 + m_4 \cdot z_4) / M$$

…… (9)

このようにして身体重心位置算出手段 3 1 の処理を実行した後、さらに、演算処理装置 1 6 は、前記身体重心加速度算出手段 3 4 の処理と、前記足首位置算出手段 3 2 の処理と、MP 位置算出手段 3 3 の処理とを 5 実行する。

この場合、身体重心加速度算出手段 3 4 の処理では、まず、前記サイクルタイム毎に身体重心位置算出手段 3 1 により求められる身体座標系 Cp における身体重心 G0 の位置 (xg, zg) の時系列データを用いて、身体座標系 Cp における身体重心 G0 の位置 (xg, zg) の 2 階微分値、 10 すなわち、身体座標系 Cp の原点 O に対する身体重心 G0 の加速度 $\tau(d^2xg/dt^2, d^2zg/dt^2)$ が求められる。そして、この加速度 $\tau(d^2xg/dt^2, d^2zg/dt^2)$ と、前記基準加速度計測手段 2 8 により求められた身体座標系 Cp の原点 O の絶対座標系 Cf における加速度 $a_0 = \tau(a_{0x}, a_{0z})$ とのベクトル和を求ることにより、絶対座標系 Cf における身 15 体重心 G0 の加速度 $a = \tau(ax, az)$ が求められる。

また、前記足首位置算出手段 3 2 の処理では、まず、前記脚体姿勢算出手段 2 9 により求められた各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 1 1 のそれぞれの傾斜角度 θ_c, θ_d のデータの今回値と、前記腰部傾斜角度計測手段 2 7 により求められた腰部 3 の傾斜角度 θ_b のデータの今回値と、 20 該大腿部 9 及び下腿部 1 1 のサイズ（長さ）のデータとから、前記各部重心位置算出手段 3 0 の処理と同様の処理によって、前記身体座標系 Cp における各脚体 2 の足首関節 1 2 の位置が求められる。具体的には、図 4 を参照して、同図 4 の左側に位置する脚体 2 に関し、下腿部 1 1 の長さ（膝関節 1 0 の中心から足首関節 1 2 の中心までの長さ）を L_d と 25 すると、身体座標系 Cp における足首関節 1 2 の位置の座標 (x_{12}, z_{12}) は、 $(L_c \cdot \sin \theta_c + L_d \cdot \sin \theta_d, -L_c \cdot \cos \theta_c - L_d \cdot \cos \theta_d)$ と

なる（但し、図4では $\theta_c < 0$ 、 $\theta_d < 0$ ）。他方の脚体2についても同様である。

さらに、この足首関節12の身体座標系 C_p における位置 (x_{12}, z_{12}) と前記身体重心位置算出手段31により求められた身体座標系 C_p における身体重心 G_0 の位置 (x_g, z_g) のデータの今回値とから、身体重心 G_0 に対する各脚体2の足首部12の位置ベクトル ${}^T(x_{12} - x_g, z_{12} - z_g)$ 、すなわち、前記式(5)における $\Delta X_f, \Delta Z_f, \Delta X_r, \Delta Z_r$ が求められる。

また、MP位置算出手段33の処理では、次のようにMP関節13aの位置（詳しくは、身体座標系 C_p におけるx軸方向の位置）が求められる。すなわち、図5を参照して、本実施形態では、人間1の直立停止状態（人間1が水平な床A上で直立姿勢で起立して各脚体2の足平部14の底面のほぼ全面を床Aに接触させた状態）における足首関節12とMP関節13aとの間の水平方向（x軸方向）の距離 Δx_{mp0} があらかじめ実測されて演算処理装置16に記憶保持されている。なお、この距離 Δx_{mp0} は、各脚体2毎に各別に実測して記憶保持してもよいが、いずれか一方の脚体2について実測したものを両脚体2、2で共用してもよい。

ここで、人間1の平地歩行等の運動中における足首関節12とMP関節13aとの間の水平方向距離はそれぞれ、一般に、人間1の直立停止状態における上記距離 Δx_{mp0} に概略的には等しい。そこで、本実施形態では、MP関節13aの位置（x軸方向の位置）は、足首関節12からx軸方向に上記距離 Δx_{mp0} だけ離れた位置として求められる。具体的には、足首位置算出手段32により得られた足首関節12の身体座標系 C_p における位置 (x_{12}, z_{12}) の今回値のx軸座標成分 x_{12} に、距離 Δx_{mp0} を加えたものが身体座標系 C_p におけるMP関節13a

の x 軸方向位置として求められる。

次に、演算処理装置 16 は、前記運動形態判断手段 37 の処理と前記床反力作用点推定手段 38 の処理と前記床反力推定手段 39 の処理とを実行する。運動形態判断手段 37 の処理では、足首位置算出手段 32 により前記の如く算出された各脚体 2 の足首関節 12 の身体座標系 C_p における位置と、脚体運動判断手段 25 による脚体運動の判断結果とに基づいて、人間 1 の運動形態が判断される。より具体的には、例えば脚体運動判断手段 25 により両脚支持状態の開始（単脚支持状態の終了）が検知された時に足首位置算出手段 32 により算出された両脚体 2, 2 の 10 それぞれの足首関節 12, 12 の位置（身体座標系 C_p における位置）から把握される両足首関節 12, 12 の間の鉛直方向距離（z 軸方向距離）が所定の閾値を越えている場合には、人間 1 の運動形態が坂道あるいは階段での歩行を行っている運動形態であると判断される。また、両脚支持状態の開始時に両足首関節 12, 12 の間の鉛直方向の距離が上 15 記所定の閾値以下である場合には、人間 1 の運動形態が平地歩行を行っている運動形態であると判断される。また、例えば脚体運動判断手段 25 により両脚支持状態が継続的に検知されたまま、身体座標系 C_p における両足首関節 12, 12 の位置と、該身体座標系 C_p の原点（これは前記の如く腰部 3 に設定されている）との水平方向距離（x 軸方向距離）が長くなりつつ、それらの鉛直方向距離（z 軸方向距離）が短くなるような場合には、人間 1 の運動形態が椅子に座ろうとする運動形態であると判断される。逆に、身体座標系 C_p における両足首関節 12, 12 の位置と、該身体座標系 C_p の原点との水平方向距離が短くなりつつ、それらの鉛直方向距離が長くなる場合には、人間 1 の運動形態が椅子から立ち上がるようとする運動形態であると判断される。

また、床反力作用点推定手段 38 の処理では、次のように接地してい

る各脚体 2 に係わる床反力作用点（足平部 1 3 の接地箇所に作用する全床反力が集中するとみなせる点）が推定される。すなわち、まず、運動形態判断手段 3 7 で判断された運動形態が平地歩行の運動形態である場合には、接地している各脚体 2 について、身体重心位置算出手段 3 1 で 5 求めた身体重心 G0 の身体座標系 Cp における位置（x 軸方向位置）の今回値と、足首位置算出手段 3 2 で求めた足首関節 1 2 の身体座標系 Cp における位置（x 軸方向位置）の今回値と MP 位置算出手段 3 3 で求めた MP 関節 1 3 a の身体座標系 Cp における位置（x 軸方向位置）の今回値とに基づいて、身体重心 G0 と足首関節 1 2 と MP 関節 1 3 a と 10 の相対的な位置関係（詳しくは、身体座標系 Cp の x 軸方向における相対的位置関係）が判断される。

そして、図 6 (a) に示すように、身体重心 G0 が足首関節 1 2 よりも後側に在るとき（該足首関節 1 2 が身体重心 G0 よりも前側にあるとき）には、その足首関節 1 2 の鉛直方向直下に床反力作用点が存在する 15 として、その足首関節 1 2 の x 軸方向位置が床反力作用点の x 軸方向位置（人間 1 の進行方向での水平方向位置）として決定される。すなわち、人間 1 の平地歩行時に、接地している脚体 2 の足首関節 1 2 が身体重心 G0 よりも前側にある状態は、通常、該脚体 2 の足平部 1 3 がその踵寄りの箇所で床 A に接地しているような状態であり、このような状態では、 20 その脚体 2 の床反力作用点は、足首関節 1 2 のほぼ直下の位置にある。そこで、図 6 (a) の如く足首関節 1 2 が身体重心 G0 よりも前側にある状態では、上記の如く接地している脚体 2 の床反力作用点の x 軸方向位置を決定する。補足すると、脚体 2 の足平部 1 3 の底面のほぼ全面が 25 接地した状態で、足首関節 1 2 が身体重心 G0 よりも前側に存在するような場合もあるが、このような場合でも、該脚体 2 に係る床反力は足平部 1 3 の踵寄りに集中するので、その脚体 2 の床反力作用点は、足首関

節 1 2 のほぼ直下の位置にある。

なお、図 6 (a) では接地している 1 つの脚体 2 のみを模式的に図示しており、他方の脚体は図示を省略している。このことは以下に説明する図 6 (b), (c) においても同様である。

5 また、図 6 (b) に示すように、x 軸方向で身体重心 G0 が M P 関節 1 3 a と足首関節 1 2 との間に在るときには、身体重心 G0 の鉛直方向直下に床反力作用点が存在するとして、その身体重心 G0 の x 軸方向位置が床反力作用点の x 軸方向位置として決定される。すなわち、人間 1 の平地歩行時に、x 軸方向における身体重心 G0 の位置が接地している 10 脚体 2 の M P 関節 1 3 a と足首関節 1 2 との間に在る状態は、該脚体 2 の足平部 1 3 の底面のほぼ全面が床 A に接地しているような状態であり、このような状態では、その脚体 2 の床反力作用点は、身体重心 G0 のほぼ直下の位置にある。そこで、図 6 (b) の如く x 軸方向における身体重心 G0 の位置が接地している脚体 2 の M P 関節 1 3 a と足首関節 1 2 15 との間に在る状態では、上記の如く接地している脚体 2 の床反力作用点の x 軸方向位置を決定する。

また、図 6 (c) に示すように、身体重心 G0 が M P 関節 1 3 a よりも前側に在るとき（該 M P 関節 1 3 a が身体重心 G0 よりも後側にあるとき）には、その M P 関節 1 3 a の鉛直方向直下に床反力作用点が存在 20 するとして、その M P 関節 1 3 a の x 軸方向位置が床反力作用点の x 軸方向位置として決定される。すなわち、人間 1 の平地歩行時に、接地している脚体 2 の M P 関節 1 3 a が身体重心 G0 よりも後側にある状態は、通常、該脚体 2 の足平部 1 3 がそのつま先寄りの箇所で床 A に接地しているような状態であり、このような状態では、その脚体 2 の床反力作用 25 点は、M P 関節 1 3 a のほぼ直下の位置にある。そこで、図 6 (c) の如く M P 関節 1 3 a が身体重心 G0 よりも後側にある状態では、上記の

如く接地している脚体 2 の床反力作用点の x 軸方向位置を決定する。補足すると、脚体 2 の足平部 13 の底面のほぼ全面が接地した状態で、MP 関節 13a が身体重心 G0 よりも後側に存在するような場合もあるが、このような場合でも、該脚体 2 に係る床反力は足平部 13 のつま先寄り 5 に集中するので、その脚体 2 の床反力作用点は、MP 関節 13a のほぼ直下の位置にある。

本実施形態の床反力作用点推定手段 38 の処理では、運動形態判断手段 37 で判断された運動形態が椅子に座ったり、あるいは椅子から立ち上がる運動形態である場合においても、上記した平地歩行の運動形態の 10 場合と全く同様に、各脚体 2 の床反力作用点の x 軸方向位置が決定される。

一方、運動形態判断手段 37 で判断された運動形態が、階段もしくは坂道での歩行の運動形態である場合には、床反力推定手段 38 は、身体重心 G0 と足首関節 12 と MP 関節 13a との相対的な位置関係によらずに、MP 関節 13a の鉛直方向直下の位置に床反力作用点が存在するとして、その MP 関節 13a の x 軸方向位置が床反力作用点の x 軸方向位置として決定される。すなわち、本願発明者等の知見によれば、人間 15 が階段や坂道で歩行するときには、接地している脚体 2 の床反力作用点は、接地中の大部分の期間において MP 関節 13a の近くに集中する 20 傾向がある。そこで、人間 1 の運動形態が階段もしくは坂道での歩行を行っている運動形態であるときには、上記の如く床反力作用点の x 軸方向位置を決定する。

床反力作用点推定手段 38 の処理では、さらに接地している各脚体 2 の床反力作用点の鉛直方向位置 (z 軸方向位置) が次のように決定される。すなわち、運動形態判断手段 37 で判断された人間 1 の運動形態が 25 いずれの運動形態であっても、まず、接地している各脚体 2 について、

該脚体 2 の足首関節 1 2 と接地面（床 A）との距離が把握される。この場合、本実施形態では、あらかじめ演算処理装置 1 6 に記憶保持された値が、足首関節 1 2 と接地面（床 A）との距離（以下、足首関節・接地面間距離という）として把握される。さらに詳細には、前記図 5 を参照して、人間 1 の前記直立停止状態における足首関節 1 2 の中心から床 A 面（接地面）までの距離 H_a （以下、足首関節基準高さ H_a という）があらかじめ実測されて、演算処理装置 1 6 に記憶保持されている。なお、足首関節基準高さ H_a は、各脚体 2 毎に各別に実測して記憶保持するようにもよいが、いずれか一方の脚体 2 についてのみ、実測して記憶保持し、それを両脚体 2 で共用してもよい。そして、上記記憶保持した足首関節基準高さ H_a が、足首関節・接地面間距離として把握される。

上記のようにして、足首関節・接地面間距離を把握した後、床反力作用点の鉛直方向位置（z 軸方向位置）は、この把握した足首・接地面間距離だけ、足首関節 1 2 の位置から鉛直下方に離れた位置として決定される。すなわち、床反力作用点の鉛直方向位置（身体座標系 C_p における位置）は、前記運動形態判断手段 3 7 が判断した人間 1 の運動形態がいずれの運動形態であっても、足首関節 1 2 の位置の z 軸成分値から、上記の如く把握した足首関節・接地面間距離を減じた値（但し、上向きを z 軸の正方向とする）として決定される。

なお、本実施形態では、後述する関節モーメント推定手段 4 0 による関節モーメントの算出を行うために、上記の如く決定した床反力作用点の身体座標系 C_p における位置（x z 座標成分）は、さらに足首位置算出手段 3 2 で算出された、身体座標系 C_p における足首関節 1 2 の位置を基準とした位置に変換される。すなわち、床反力作用点の推定位置は、足首関節 1 2 の位置を基準とした位置ベクトル（以下、床反力作用点ベクトルという）に変換されて求められる。

以上説明した床反力作用点推定手段38の処理によって、接地している各脚体2について、その足首関節12を基準とした床反力作用点ベクトル(x軸方向及びz軸方向の位置)が推定される。

前記床反力推定手段39の処理では、前記脚体運動判断手段25により今回のサイクルタイムで判断された脚体2の運動状態が单脚支持状態である場合には、人間1の体重M及び重力加速度gの値(これらはあらかじめ演算処理装置16に記憶されている)と、前記身体重心加速度算出手段34により求められた絶対座標系Cfにおける身体重心G0の加速度 $a = T(a_x, a_z)$ の今回値とから、前記式(2)により、接地している脚体2に作用する床反力 $F = T(F_x, F_z)$ の推定値が求められる。

尚、この場合、非接地側の脚体2(遊脚側の脚体2)に作用する床反力は、 $T(0, 0)$ である。

また、脚体運動判断手段25により今回のサイクルタイムで判断された脚体2の運動状態が両脚支持状態である場合には、人間1の体重M及び重力加速度gと、前記身体重心加速度算出手段34により求められた絶対座標系Cfにおける身体重心G0の加速度 $a = T(a_x, a_z)$ の今回値と、前記足首位置算出手段32により求められた各脚体2の足首関節12の身体重心G0に対する位置の今回値のデータ(式(5)の $\Delta X_f, \Delta Z_f, \Delta X_r, \Delta Z_r$ のデータの今回値)とから、前記式(5)により、各脚体2毎の床反力 $F_f = T(F_{fx}, F_{fz}), F_r = T(F_{rx}, F_{rz})$ の推定値が求められる。

一方、演算処理装置16は、上述のような身体重心位置算出手段31、身体重心加速度算出手段34、足首位置算出手段32、MP位置算出手段33、運動形態判断手段37、床反力作用点推定手段38、及び床反力推定手段39の処理と並行して、前記脚体各部加速度算出手段35および脚体各部角加速度算出手段36の処理を実行する。

この場合、前記脚体各部加速度算出手段 35 の処理では、前記身体重心加速度算出手段 34 の処理と同様、まず、前記サイクルタイム毎に前記各部重心位置算出手段 30 により求められる身体座標系 C_p における各脚体 2 の剛体相当部である大腿部 9 及び下腿部 11 の重心 G_1, G_2 5 の位置のそれぞれの時系列データを用いて、身体座標系 C_p における大腿部 9 及び下腿部 11 の重心 G_1, G_2 の位置のそれぞれの 2 階微分値、すなわち、身体座標系 C_p における大腿部 9 及び下腿部 11 の重心 G_1, G_2 のそれぞれの加速度（身体座標系 C_p の原点 O に対する加速度）が求められる。そして、このそれぞれの加速度と、前記基準加速度計測手 10 段 28 により得られた腰部 3 の絶対座標系 C_f における加速度 $a_0 = T(a_{0x}, a_{0z})$ とのベクトル和を求めることにより、絶対座標系 C_f における大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの加速度（より詳しくは、該加速度の絶対座標系 C_f における座標成分）が求められる。

また、前記脚体各部角加速度算出手段 36 の処理では、前記サイクル 15 タイム毎に前記脚体姿勢算出手段 29 により求められる各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの傾斜角度 θ_c, θ_d の時系列データを用いて、該大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれ傾斜角度 θ_c, θ_d の 2 階微分値、すなわち、大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの角加速度が求められる。

20 次に、演算処理装置 16 は、前記関節モーメント推定手段 40 の処理を実行して、各脚体 2 の膝関節 10 及び股関節 8 に作用するモーメントを求める。この処理は、前記床反力推定手段 39、脚体各部加速度算出手段 35、脚体各部角加速度算出手段 36、床反力作用点推定手段 38、及び脚体姿勢算出手段 29 によりそれぞれ求められたデータの今回値を 25 用いて、所謂逆動力学モデルに基づいて行われる。この逆動力学モデルは、人間 1 の各剛体相当部の並進運動に関する運動方程式と回転運動に

関する運動方程式とを用いて、床反力作用点により近い関節から順番に該関節に作用するモーメントを求めるものであり、本実施形態では、各脚体2の膝関節10、股関節8に作用するモーメントが順番に求められる。

5 さらに詳細には、図7を参照して、まず、各脚体2の下腿部11に関し、下腿部11の先端部の足首関節12に作用する力（関節反力）、下腿部11の膝関節10の部分に作用する力（関節反力）、及び下腿部11の重心G2の並進加速度を、それぞれ絶対座標系Cfにおける成分表記によって、 $T(F_{1x}, F_{1z})$ 、 $T(F_{2x}, F_{2z})$ 、 $T(a_{2x}, a_{2z})$ とし、該下腿部11の重量を m_2 とする。このとき、下腿部11の重心G2の並進運動に関する運動方程式は、次式（10）となる。

$$T(m_2 \cdot a_{2x}, m_2 \cdot a_{2z}) = T(F_{1x} - F_{2x}, F_{1z} - F_{2z} - m_2 \cdot g)$$

ゆえに、

$$T(F_{2x}, F_{2z}) = T(F_{1x} - m_2 \cdot a_{2x}, F_{1z} - m_2 \cdot a_{2z} - m_2 \cdot g)$$

15 $\dots \dots \quad (10)$

ここで、下腿部11の重心G2の加速度 $T(a_{2x}, a_{2z})$ は、前記脚体各部加速度算出手段35により求められるものである。また、下腿部11の先端部の足首関節12に作用する関節反力 $T(F_{1x}, F_{1z})$ は、近似的には、該下腿部11を有する脚体2について前記床反力推定手段39により求められる床反力の推定値に等しい。より詳しくは、単脚支持状態において、該脚体2が接地しているときには、関節反力 $T(F_{1x}, F_{1z})$ は、前記式（2）により求められる床反力 $T(F_x, F_z)$ であり、該脚体2が遊脚側の脚体であるときには、 $T(F_{1x}, F_{1z}) = T(0, 0)$ である。また、両脚支持状態において、該脚体2が人間1の進行方向前方に向かって後側の脚体であるときには、関節反力 $T(F_{1x}, F_{1z})$ は、前記式（5）の床反力 $T(F_{rx}, F_{rz})$ であり、該脚体2が前側の脚体であると

きには、前記式(5)の床反力 $T(F_{fx}, F_{fz})$ である。

従って、各脚体2の膝関節10に作用する関節反力 $T(F_{2x}, F_{2z})$ は、脚体各部加速度算出手段35により求められた下腿部11の重心G2の加速度 $T(a_{2x}, a_{2z})$ のデータと、床反力推定手段39により求められる5床反力($=T(F_{1x}, F_{1z})$)のデータと、下腿部11のあらかじめ求められた重量 m_2 のデータと、重力加速度 g の値とから、上記式(10)により求められる。

また、図7を参照して、下腿部11の先端部の足首関節12に作用するモーメントを M_1 、下腿部11の膝関節10の部分に作用するモーメントを M_2 、下腿部11の重心G2の回りの慣性モーメントを I_{G2} 、下腿部11の重心G2の回りの角加速度を α_2 とする。また、前記図4に対応させて、下腿部11の重心G2と膝関節10の中心との間の距離を t_2 、下腿部11の重心G2と足首部12との間の距離を t_2' (= $L_d - t_2$)とすると、下腿部11の重心G2の回りの回転運動に関する運動方程式は、15次式(11)となる。

$$I_{G2} \cdot \alpha_2 = M_1 - M_2 + F_{1x} \cdot t_2' \cdot \cos \theta_d - F_{1z} \cdot t_2' \cdot \sin \theta_d \\ + F_{2x} \cdot t_2 \cdot \cos \theta_d - F_{2z} \cdot t_2 \cdot \sin \theta_d$$

ゆえに

$$M_2 = M_1 - I_{G2} \cdot \alpha_2 + F_{1x} \cdot t_2' \cdot \cos \theta_d - F_{1z} \cdot t_2' \cdot \sin \theta_d \\ + F_{2x} \cdot t_2 \cdot \cos \theta_d - F_{2z} \cdot t_2 \cdot \sin \theta_d \\ \dots\dots (11)$$

ここで、式(11)中の M_1 は、同式(11)に係わる下腿部11を有する脚体2について前記床反力作用点推定手段38により前述の如く求められる床反力作用点ベクトルと、該脚体2について前記床反力推定手段39により求められる床反力ベクトルとの外積(ベクトル積)として得られるモーメントである。また、 α_2 は、前記脚体各部角加速度算

出手段 3 6 により求められる下腿部 1 1 の角加速度である。また、 θ_d は前記脚体姿勢算出手段 2 9 により求められる下腿部 1 1 の傾斜角度である。また、 $T(F_{1x}, F_{1z})$ は、前述の通り、床反力推定手段 3 9 により求められる床反力の推定値である。さらに、 $T(F_{2x}, F_{2z})$ は、前記式 5 (10) により求められるものである。また、慣性モーメント I_{G2} は下腿部 1 1 の重量 m_2 やサイズのデータ等と共に、あらかじめ求められて演算処理装置 1 6 に記憶されるものである。

従って、膝関節 1 0 に作用するモーメント M_2 は、床反力推定手段 3 9 により得られた床反力の推定値のデータと、床反力作用点推定手段 3 10 8 により得られた床反力作用点ベクトルの推定値のデータと、脚体各部角加速度算出手段 3 6 により得られた下腿部 1 1 の角加速度 α_2 のデータと、脚体姿勢算出手段 2 9 により得られた下腿部 1 1 の傾斜角度 θ_d のデータと、前記式 (10) により求められた関節反力 $T(F_{2x}, F_{2z})$ のデータと、あらかじめ求めた下腿部 1 1 の慣性モーメント I_{G2} 、サイズ 15 (L_d)、重心 $G2$ の位置($t2$)のデータとから前記式 (11) により求められる。

関節モーメント推定手段 4 0 は、上記のようにして下腿部 1 1 の膝関節 1 0 の部分に作用するモーメント M_2 を求めた後、その算出処理と同様の処理によって、大腿部 9 の股関節 8 の部分に作用するモーメントを 20 求める。この処理の基本的な考え方は、膝関節 1 0 のモーメント M_2 を求める手法と同一であるので、詳細な図示及び説明は省略するが、その概要は次の通りである。

すなわち、まず、大腿部 9 の重心 $G1$ (図 4 参照) の並進運動に関する運動方程式に基づく次式 (12) (前記式 (10) と同じ形の式) により、大腿部 9 の股関節 8 の部分に作用する関節反力 $T(F_{3x}, F_{3z})$ が求められる。

$$T(F_{3x}, F_{3z}) = T(F_{2x} - m_1 \cdot a_{1x}, F_{2z} - m_1 \cdot a_{1z} - m_1 \cdot g)$$

…… (12)

ここで、 $T(F_{2x}, F_{2z})$ は、先に前記式(10)により求めた膝関節10の関節反力である。また、 $T(a_{1x}, a_{1z})$ は、前記脚体各部加速度算出手段35により求められる大腿部9の重心G1の絶対座標系Cfにおける加速度(並進加速度)である。また、 m_1 はあらかじめ求めた大腿部9の重量、 g は重力加速度である。

次いで、大腿部9の重心G1の回りの回転運動に関する運動方程式に基づく次式(13)(前記式(11)と同じ形の式)により、大腿部9の股関節8の部分に作用するモーメント M_3 が求められる。

$$M_3 = M_2 - I_{G1} \cdot \alpha_1 + F_{2x} \cdot t_{1'} \cdot \cos \theta_c - F_{2z} \cdot t_{1'} \cdot \sin \theta_c \\ + F_{3x} \cdot t_{1'} \cdot \cos \theta_c - F_{3z} \cdot t_{1'} \cdot \sin \theta_c$$

…… (13)

ここで、 M_2 は、前記式(11)により求められた膝関節10のモーメント、 $T(F_{2x}, F_{2z})$ は、前記式(10)により求められた膝関節10の関節反力、 $T(F_{3x}, F_{3z})$ は、前記式(12)により求められた股関節8の関節反力、 I_{G1} は、あらかじめ求めた大腿部9の重心G1の回りの慣性モーメント、 α_1 は前記脚体各部角加速度算出手段36により求められる大腿部9の角加速度、 θ_c は前記脚体姿勢算出手段29により求められる大腿部9の傾斜角度である。また、 $t_{1'}$ は、股関節8の中心から大腿部9の重心G1までの距離(図4参照)、 $t_{1'}$ は、膝関節10の中心から大腿部9の重心G1までの距離(図4では $L_c - t_{1'}$)であり、これらは、あらかじめ求めた重心G1の位置や大腿部9のサイズ(長さ)から定まるものである。

以上説明した処理が、前記演算処理装置16のサイクルタイム毎に逐次実行され、各脚体2に作用する床反力や、各脚体2の膝関節10及び

股関節 8 に作用するモーメントが逐次リアルタイムで推定される。

尚、本明細書での詳細な説明は省略するが、求められた膝関節 10 や股関節 8 のモーメントの推定値は、例えば人間 1 の歩行を補助する装置（膝関節 10 や股関節 8 に補助トルクを付与可能な電動モータ等を含む装置）の制御に用いられる。

前述した演算処理装置 16 の処理により求められた床反力作用点の推定値の経時変化の様子の一例を図 8 及び図 9 に実線で示す。図 8 及び図 9 は例えば約 4.5 km/h の移動速度で人間 1 が平地歩行を行った場合に一方の脚体 2 が接地してから離床するまでの該脚体 2 の床反力作用点の推定値の x 軸方向成分（進行方向における水平方向成分）、z 軸方向成分（鉛直方向成分）の経時変化の様子をそれぞれ実線で示したものである。この場合、図 8 では x 軸方向成分は、床 A に対して固定された絶対座標系 C_f に変換して表している。また、図 9 では z 軸方向成分は、身体座標系 C_p における z 軸座標値（股関節 8 の中心から床反力作用点までの鉛直方向距離に相当）で表している。また、図 8、図 9 には、フォースプレート等を用いて実測した床反力作用点の x 軸方向成分、z 軸方向成分を破線で併記している。これらの図 8 及び図 9 に見られるように、床反力作用点の推定値は、実測値に比較的良好な精度で合致する。

なお、図 9 に示す z 軸方向成分に関し、脚体 2 が離床する直前では、推定値と実測値の誤差が比較的大きくなる。これは、本実施形態では、足首関節 12 と床反力作用点との間の鉛直方向距離を一定として（図 5 の足首関節・接地面間距離 H_a に等しいとして）、床反力作用点の鉛直方向位置（z 軸方向位置）を求めていたため、脚体 2 の離床の直前のように、足平部 13 の踵側が床 A から浮くような状況では、床反力作用点の鉛直方向位置の誤差が大きくなるからである。

また、図 8 に関して補足すると、同図 8 には、MP 関節 13a、身体

重心 G_0 、および足首関節 1 2 の x 軸方向位置の算出値（絶対座標系 C_f に変換したもの）も併記している。平地歩行における床反力作用点の x 軸方向位置は、前述のように推定されるので、身体重心 G_0 が足首関節 1 2 よりも後側に在る期間（時刻 t_1 までの期間）では、床反力作用点の x 軸方向位置は、足首関節 1 2 の x 軸方向位置に合致し、身体重心 G_0 が x 軸方向で足首関節 1 2 と MP 関節 1 3 a との間に在る期間（時刻 $t_1 \sim t_2$ の期間）では、床反力作用点の x 軸方向位置は身体重心 G_0 の x 軸方向位置に合致している。さらに、身体重心 G_0 が MP 関節 1 3 a よりも前側に在る期間（時刻 t_2 以降の期間）では、床反力作用点の x 軸方向位置は、MP 関節 1 3 a の x 軸方向位置に合致している。

また、図 1 0～図 1 9 に膝関節 1 0 及び股関節 8 のモーメントの推定値の経時変化の様子を実線で例示する。図 1 0 および図 1 1 は例えば約 4.5 km/h の移動速度で人間 1 が平地歩行を行った場合に、前記演算処理装置 1 6 の演算処理で求められた膝関節モーメント、股関節モーメントをそれぞれ例示するもの、図 1 2 および図 1 3 は人間 1 が階段の下り歩行を行った場合に求められた膝関節モーメント、股関節モーメントをそれぞれ例示するもの、図 1 4 および図 1 5 は人間 1 が階段の登り歩行を行った場合に求められた膝関節モーメント、股関節モーメントをそれぞれ例示するものである。また、図 1 6 および図 1 7 は人間 1 が椅子に座る動作を行なった場合に求められた膝関節モーメント、股関節モーメントをそれぞれ例示するもの、図 1 8 および図 1 9 は人間 1 が椅子から立ち上がる動作を行った場合に求められた膝関節モーメント、股関節モーメントをそれぞれ例示するものである。これらの図 1 0～図 1 9 では、トルクメータ等を用いて実測したモーメントを破線で併記している。これらの図 1 0～図 1 9 に見られるように、モーメントの推定値の変化の傾向は、実測値に良く合致している。このことから、本実施形態で求

められる床反力作用点の推定位置は、脚体2の関節モーメントを推定する上で十分に適正な精度で求められることが判る。

以上のように本実施形態によれば、床反力作用点を推定するために複数種類の相關データ等を使用することなく、人間1の平地歩行や、階段もしくは坂道での歩行、あるいは椅子に座ったり、椅子から立ち上がる動作を行なっているときの床反力作用点の位置を簡単な手法で推定することができる。

次に、本発明の第2実施形態を前記図2～図7、並びに図20を参照して説明する。なお、本実施形態は、第1実施形態と一部の構成および10処理のみが相違するものであるので、第1実施形態と同一構成もしくは同一機能部分については、第1実施形態と同一の参照符号および図面を用いて説明を省略する。

図2を参照して、本実施形態では、人間1には、前記第1実施形態で説明した装置に加えて、各脚体2の足首関節12に、該足首関節12の15屈曲角度 $\Delta\theta_e$ に応じた信号を出力する足首関節角度センサ24が装着されている。該足首角度センサ24は、膝関節角度センサ23等と同様にポテンショメータにより構成されたものであり、足首関節12に図示しないベルト等を介して固定されている。そして、足首関節角度センサ24は、その出力を演算処理装置16に入力すべく図示しない信号線を20介して演算処理装置16に接続されている。

ここで、各足首関節角度センサ24が検出する屈曲角度 $\Delta\theta_e$ は、足首関節12の中心とこの足首関節12に連なる足平部13のMP関節13aの中心とを結ぶ線と、下腿部11の軸心とのなす角度である。

また、図3を参照して、本実施形態における演算処理装置16では、25上記各足首関節角度センサ24の出力が入力され、それが、MP位置算出手段33に与えられるようになっている。また、MP位置算出手段3

3には、足首位置算出手段32により算出された足首関節12の位置（身体座標系Cpにおける位置）が前記第1実施形態と同様に与えられる他、さらに、脚体姿勢算出手段29により算出された下腿部11の傾斜角度θdが与えられるようになっている。

5 以上説明した以外の構成は、前記第1実施形態と同一である。

前述のような構成を有する本実施形態では、演算処理装置16のMP位置算出手段33の処理と床反力作用点推定手段38の処理のみが前記第1実施形態と相違している。より詳しくは、本実施形態は、MP関節13aの位置を前記第1実施形態のものよりもより精度よく把握し、ひいては、床反力作用点の位置の推定精度を第1実施形態のものよりも高めるものである。以下に、本実施形態におけるMP位置算出手段33の処理と床反力作用点推定手段38の処理とを詳説する。

MP位置算出手段33の処理では、足首関節角度センサ24の検出データ等を用いて次のようにMP関節13aの位置（詳しくは身体座標系Cpにおけるx軸方向およびz軸方向の位置）が求められる。

すなわち、図20を参照して、足首関節12の中心とMP関節13aの中心とを結ぶ線分S（以下、足平幹線Sという）を想定し、この足平幹線Sが鉛直方向（z軸方向）に対してなす角度（足平幹線Sの傾斜角度）をθe、足平幹線Sの長さ（足首関節12とMP関節13aとの距離）をLsとする。このとき、足首関節12とMP関節13aとの水平方向（x軸方向）の距離△x_{mp}及び鉛直方向（z軸方向）の距離△z_{mp}、すなわち、足首関節12に対するMP関節13aの位置^T（△x_{mp}、△z_{mp}）は次式（14）により与えられる。

$${}^T(\Delta x_{mp}, \Delta z_{mp}) = (L_s \cdot \sin \theta_e, L_s \cdot \cos \theta_e)$$

s は定数となる。

また、足平幹線 S の傾斜角度 θ_e は、前記足首関節角度センサ 24 により検出される足首関節 12 の屈曲角度 $\Delta \theta_e$ と、前記脚体姿勢算出手段 29 により求められる下腿部 11 の傾斜角度 θ_d とを用いて次式 (1 5) により与えられる。

$$\theta_e = \theta_d - (180 - \Delta \theta_e) \dots \dots (15)$$

なお、式 (15) では、角度の単位として「度」を用いている。

そこで、MP 位置算出手段 33 の処理では、まず、前記脚体姿勢算出手段 29 により求められた各脚体 2 の下腿部 11 の傾斜角度 θ_d のデータの今回値と、該脚体 2 に装着されている前記足首関節角度センサ 24 から得られる足首関節 12 の屈曲角度 $\Delta \theta_e$ の検出データの今回値とかく、上記式 (15) により、足平幹線 S の傾斜角度 θ_e が求められる。

そして、この求めた傾斜角度 θ_e と、人間 1 に対してあらかじめ実測して演算処理装置 16 に記憶保持した足平幹線 S の長さ L_s とから、前記式 (14) により足首関節 12 に対する MP 関節 13a の位置 $T(\Delta x_{mp}, \Delta z_{mp})$ が求められる。さらに、この位置 $T(\Delta x_{mp}, \Delta z_{mp})$ と、前記足首位置算出手段 32 で求めた足首関節 12 の位置 (身体座標系 C_p における位置) $T(x_{12}, z_{12})$ とのベクトル和を演算することにより、身体座標系 C_p における MP 関節 13a の位置が求められる。

また、床反力作用点推定手段 38 の処理では、接地している各脚体 2 の床反力作用点の水平方向位置 (x 軸方向位置) は、前記第 1 実施形態と同一の手法で求められる。従って、床反力作用点の水平方向位置の推定処理については説明を省略する。

一方、床反力作用点推定手段 38 の処理では、接地している各脚体 2 の床反力作用点の鉛直方向位置 (z 軸方向位置) の推定手法は、前記第 1 実施形態と相違し、次のように床反力作用点の鉛直方向位置が決定さ

れる。すなわち、運動形態判断手段 37 で判断された人間 1 の運動形態がいずれの運動形態であっても、まず、接地している各脚体 2 について、該脚体 2 の足首関節 12 と接地面（床 A）との距離、すなわち、足首関節・接地面間距離が把握される。この場合、足首関節・接地面間距離の
5 把握の仕方は、身体重心 G0 が x 軸方向で MP 関節 13a の前側にあるか後側にあるかで分けられる。身体重心 G0 が MP 関節 13a の後側にある場合には、一般に、足平部 13 の踵の底面が、床 A にほぼ接觸しているか、もしくは床 A 面とほぼ同等の高さ位置に存在していると考えられる。そこで、この場合には、人間 1 の直立停止状態であらかじめ実測
10 されて演算処理装置 16 に記憶保持された前記足首関節基準高さ Ha (図 5 参照) が足首関節・接地面間距離として把握される。

また、身体重心 G0 が MP 関節 13a の前側にある場合には、一般に足平部 13 の踵が床 A 面よりも上側に浮いている。この場合には、次のようにして、足首関節・接地面間距離が算出される。すなわち、前記図
15 20 を参照して、足平部 13 の踵が床 A 面よりも上側に浮いている場合には、足首関節・接地面間距離は、足首関節 12 と MP 関節 13a との間の鉛直方向距離 Δz_{mp} と、MP 関節 13a の接地面（床 A 面）からの距離との和になる。この場合、MP 関節 13a の接地面からの距離は、前記図 5 に示したように人間 1 が直立姿勢で起立して、足平部 13 の底
20 面のほぼ全面を床 A に接觸させた状態（前記直立停止状態）における MP 関節 13a の床 A 面からの距離 Hb (以下、MP 関節基準高さ Hb という) とほぼ同一である。そこで、本実施形態では、上記 MP 関節基準高さ Hb が前記足首関節基準高さ Ha と共にあらかじめ実測されて演算処理装置 16 に記憶保持されている。そして、身体重心 G0 が MP 関節
25 13a の前側にある場合には、足首関節 12 及び MP 関節 13a のそれぞれの身体座標系 Cp における位置から把握される、それらの関節間の

鉛直方向距離 Δz_{mp} と、前記 MP 関節基準高さ H_b との和が足首関節・接地面間距離として求められる。

なお、MP 関節基準高さ H_b は、各足平部 1 3 毎に実測して記憶保持しておいてもよいが、いずれか一方の足平部 1 3 について実測したもの 5 を、両足平部 1 3, 1 3 について共用してもよい。また、本発明の床反力作用点推定方法に対応させると、前記足首関節基準高さ H_a および MP 関節基準高さ H_b はそれぞれ第 1 基本鉛直方向距離、第 2 基本鉛直方向距離に相当するものである。

上記のようにして、足首関節・接地面間距離を把握した後、床反力作用点の鉛直方向位置 (z 軸方向位置) は、前記第 1 実施形態と同様に、その把握した足首・接地面間距離だけ、足首関節 1 2 の位置から鉛直下方に離れた位置として決定される。すなわち、床反力作用点の鉛直方向位置 (身体座標系 C_p における位置) は、前記運動形態判断手段 3 7 が判断した人間 1 の運動形態がいずれの運動形態であっても、足首関節 15 1 2 の位置の z 軸成分値から、上記の如く把握した足首関節・接地面間距離を減じた値 (但し、上向きを z 軸の正方向とする) として決定される。

なお、本実施形態においても、前記第 1 実施形態と同様に、関節モーメント推定手段 4 0 による関節モーメントの算出を行うために、上記の如く決定した床反力作用点の身体座標系 C_p における位置 (x z 座標成分) は、さらに足首位置算出手段 3 2 で算出された、身体座標系 C_p における足首関節 1 2 の位置を基準とした位置に変換される。

以上説明した MP 位置算出手段 3 3 および床反力作用点推定手段 3 8 以外の演算処理装置 1 6 の処理は、前記第 1 実施形態と同一である。

かかる本実施形態では、MP 関節 1 3 a の位置 (x 軸方向および z 軸 25 方向位置) が比較的精度よく把握できるため、床反力作用点の位置、特に鉛直方向位置を第 1 実施形態のものよりも精度よく推定できる。ひい

ては、膝関節 10 や股関節 8 に作用する関節モーメントも第 1 実施形態のものよりも精度よく推定することができる。

なお、床反力作用点の鉛直方向位置を推定するために求める足首関節・接地面間距離は、前記第 1 実施形態および第 2 実施形態で説明した手法以外の手法で求めることも可能である。例えば、各脚体 2 の下腿部 11 の適当な部位（具体的には、足首関節 12 から膝関節 10 側に下腿部 11 の軸心方向に所定距離だけ離れた部位）に、赤外線測距センサ等の光学的測距センサを装着しておき、この測距センサを備えた部位と床面（脚体 2 の接地面）との間の、下腿部 11 の軸心方向における距離を測定する。そして、この測定距離と下腿部 11 の傾斜角度 θ_d とから、幾何学演算（三角関数演算）により測距センサを備えた部位と床面との鉛直方向距離（以下、ここではセンサ・床面間鉛直距離という）を算出する。さらに、測距センサを備えた部位と足首関節 12との距離（固定値）、および下腿部 11 の傾斜角度 θ_d とから、三角関数演算により該部位と足首関節 12 との間の鉛直方向距離を求め、その求めた鉛直方向距離を前記センサ・床面間鉛直距離から差し引くことで、足首関節・接地面間距離を求める。このように足首関節・接地面間距離を求めることで、足首関節角度センサ 24 を用いることなく、床反力作用点の鉛直方向位置を精度よく推定することができる。なお、この場合、床反力作用点の水平方向位置は、前記第 1 実施形態と同じ手法で推定するようすればよい。

また、以上説明した実施形態では、本発明を人間 1 に適用した場合を例にとって説明したが、二足歩行移動体としての二足歩行ロボットにも本発明を適用することができる。

以上の説明から明らかなように、本発明は人間などの二足歩行移動体の脚体の関節モーメントを推定できるので、その推定した関節モーメントを人間の歩行補助を行う歩行補助装置などの動作制御に適用できる。例えば、推定した関節モーメントの一部を歩行補助装置で発生させて人間の負担を軽減するような制御を行うことが可能である。

5

請求の範囲

1. 二足歩行移動体の各脚体毎の床反力作用点の位置を逐次推定する方法であって、

少なくとも前記二足歩行移動体の平地歩行を含む運動中に、該二足歩行移動体の重心の位置と各脚体の足首関節の位置と該脚体の足平部の中足趾節関節の位置とをそれぞれ逐次把握すると共に、接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を逐次把握する第1ステップと、

前記運動中に接地している各脚体毎に、各脚体の床反力作用点の水平方向位置を、前記第1ステップで把握した前記重心の位置と該脚体の足首関節の位置と該脚体の中足趾節関節の位置との間の相対的位置関係に応じて逐次推定すると共に、該脚体の床反力作用点の鉛直方向位置を、前記第1ステップで把握した該脚体の足首関節から接地面までの前記鉛直方向距離だけ該足首関節から鉛直方向下方に離れた位置として逐次推定する第2ステップとを備えたことを特徴とする二足歩行移動体の床反力作用点推定方法。

2. 前記第2ステップで前記床反力作用点の水平方向位置を推定するとき、接地している各脚体毎に、前記重心の位置が該脚体の足首関節の位置よりも前記二足歩行移動体の進行方向で後側に存在するときには、該脚体の足首関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも前記二足歩行移動体の進行方向で前側に存在するときには、該脚体の中足趾節関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、前記重心の位置が前記二足移動体の進行方向で該脚体の足首関節の位置と中足趾節関節の位置との間に存在するときには、前記重心の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定するこ

とを特徴とする請求の範囲第1項に記載の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法。

3. 前記二足歩行移動体の直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離をあらかじめ計測して記憶保持しておき、前

5 記第1ステップで前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を把握するとき、前記記憶保持した鉛直方向距離を、前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握することを特徴とする請求の範囲第1項または第2項に記載の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法。

10 4. 前記二足歩行移動体の直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離と該脚体の中足趾節関節から接地面までの鉛直方向距離とをそれぞれ第1基本鉛直方向距離及び第2基本鉛直方向距離としてあらかじめ計測して記憶保持しておき、

前記第1ステップで前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を把握するとき、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で後側に存在するときには、前記第1基本鉛直方向距離を該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握し、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で前側に存在するときには、該脚体の足首関節と中足趾節関節との間の鉛直方向距離を求めた後、その求めた鉛直方向距離に前記第2基本鉛直方向距離を加えた値を該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握することを特徴とする請求の範囲第1項または第2項に記載の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法。

25 5. 少なくとも前記二足歩行移動体の平地歩行と該二足歩行移動体の階段又は坂道での歩行とを含む該二足歩行移動体の運動中に、前記第1ス

テップの処理を実行しつつ、該二足歩行移動体の運動形態を判断し、その判断した二足歩行移動体の運動形態が平地歩行であるときには、前記第2ステップの処理により、接地している各脚体毎の床反力作用点の位置を逐次推定し、前記判断した二足歩行移動体の運動形態が階段又は坂道での歩行であるときには、接地している各脚体毎に、各脚体の中足趾節関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として逐次推定すると共に、該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離だけ該足首関節から鉛直方向下方に離れた位置を該脚体の床反力作用点の鉛直方向位置として逐次推定することを特徴とする請求の範囲第1項または第2項に記載の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法。

6. 前記二足歩行移動体の運動形態が、平地歩行であるか、階段又は坂道での歩行であるかを少なくとも該二足歩行移動体の両脚体の足首関節の間の鉛直方向距離に基づき判断することを特徴とする請求の範囲第5項に記載の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法。

15 7. 請求の範囲第1項に記載の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法により逐次求めた床反力作用点の位置の推定値を用いて前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定する方法であって、

前記二足歩行移動体の接地している各脚体の床反力を少なくとも該二足歩行移動体の上体の所定部位の加速度を検出すべく該上体に装着した加速度センサの検出出力と該上体の傾斜角度を検出すべく該上体に装着した上体傾斜センサの検出出力を用いて逐次推定するステップと、前記二足歩行移動体を複数の剛体の連結体として表してなる剛体リンクモデルの各剛体に対応する二足歩行移動体の各剛体相当部の傾斜角度、該剛体相当部の重心の加速度及び該剛体相当部の角加速度を少なくとも前記上体傾斜センサの検出出力と該二足歩行移動体の各脚体の関節の屈曲

角度を検出すべく該関節に装着した角度センサの検出出力を用いて逐次把握するステップとを備え、

前記床反力の推定値と、前記床反力作用点の位置の推定値と、前記各剛体相当部の傾斜角度、該剛体相当部の重心の加速度及び該剛体相当部
5 の角加速度と、各剛体相当部のあらかじめ求めた重量及びサイズと、各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置と、各剛体相当部のあらかじめ求めた慣性モーメントとを用いて逆動力学モデルに基づき前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定することを特徴とする二足歩行移動体の関節モー
10 メント推定方法。

1/20

FIG. 1 (a)

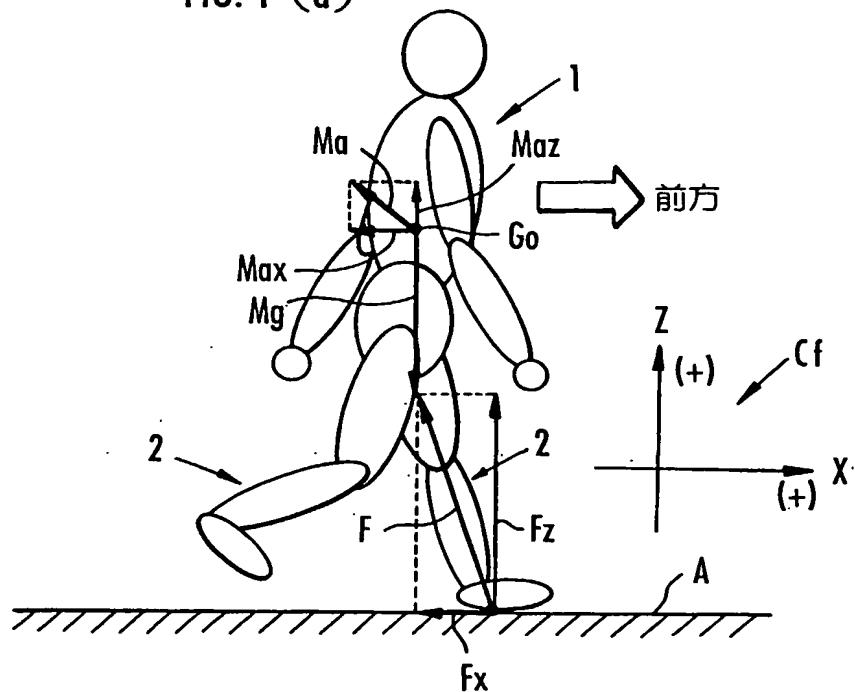
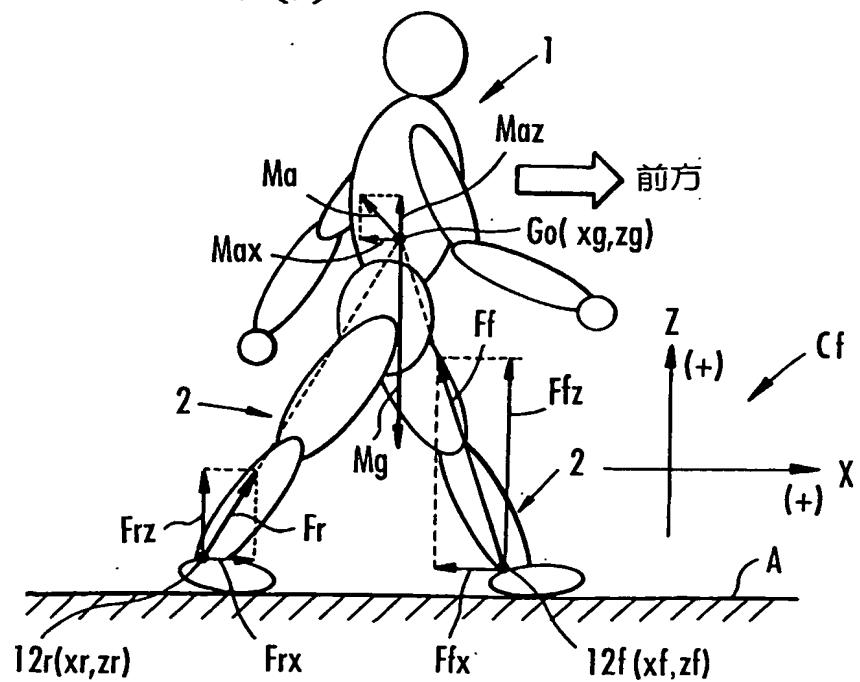
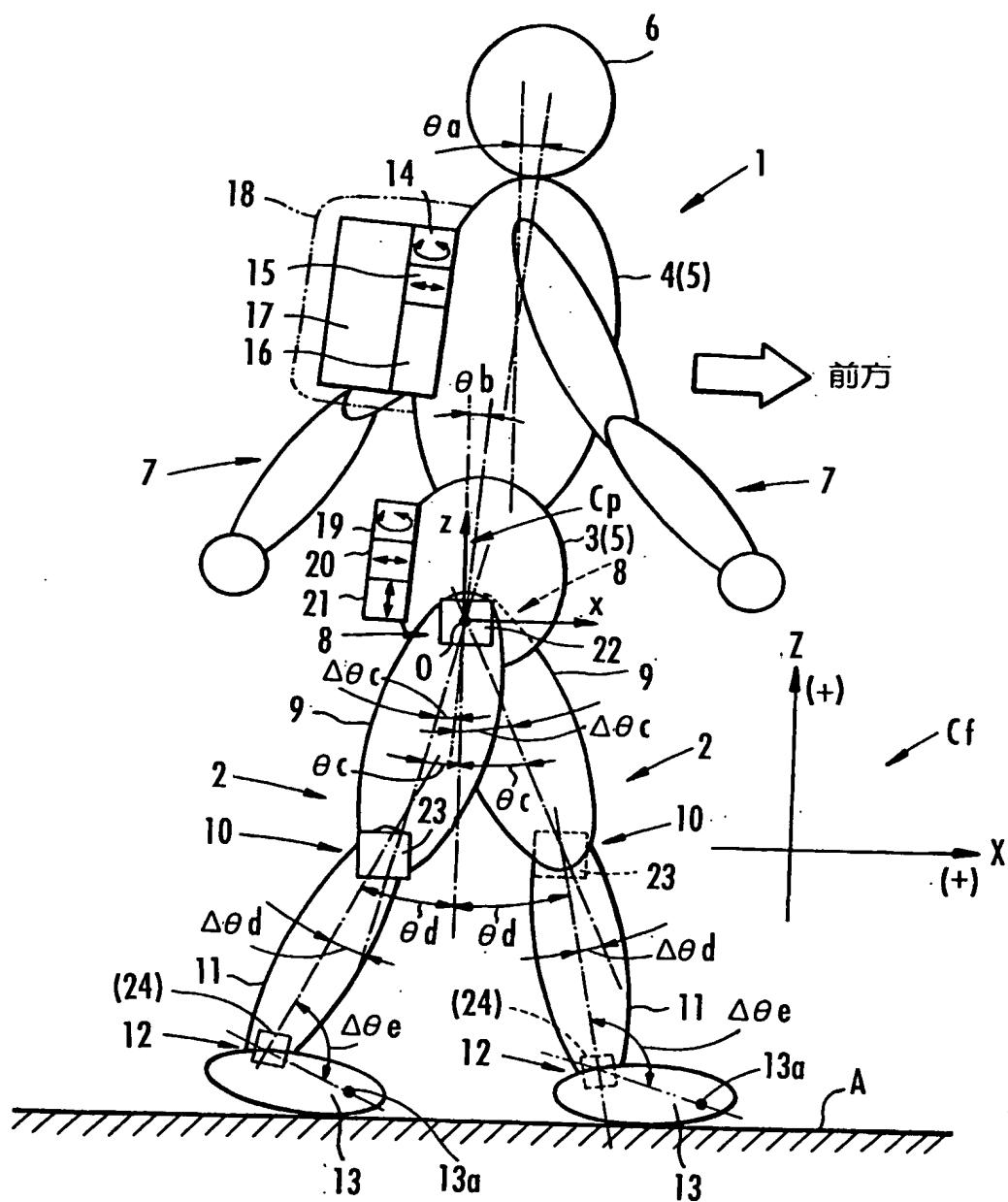


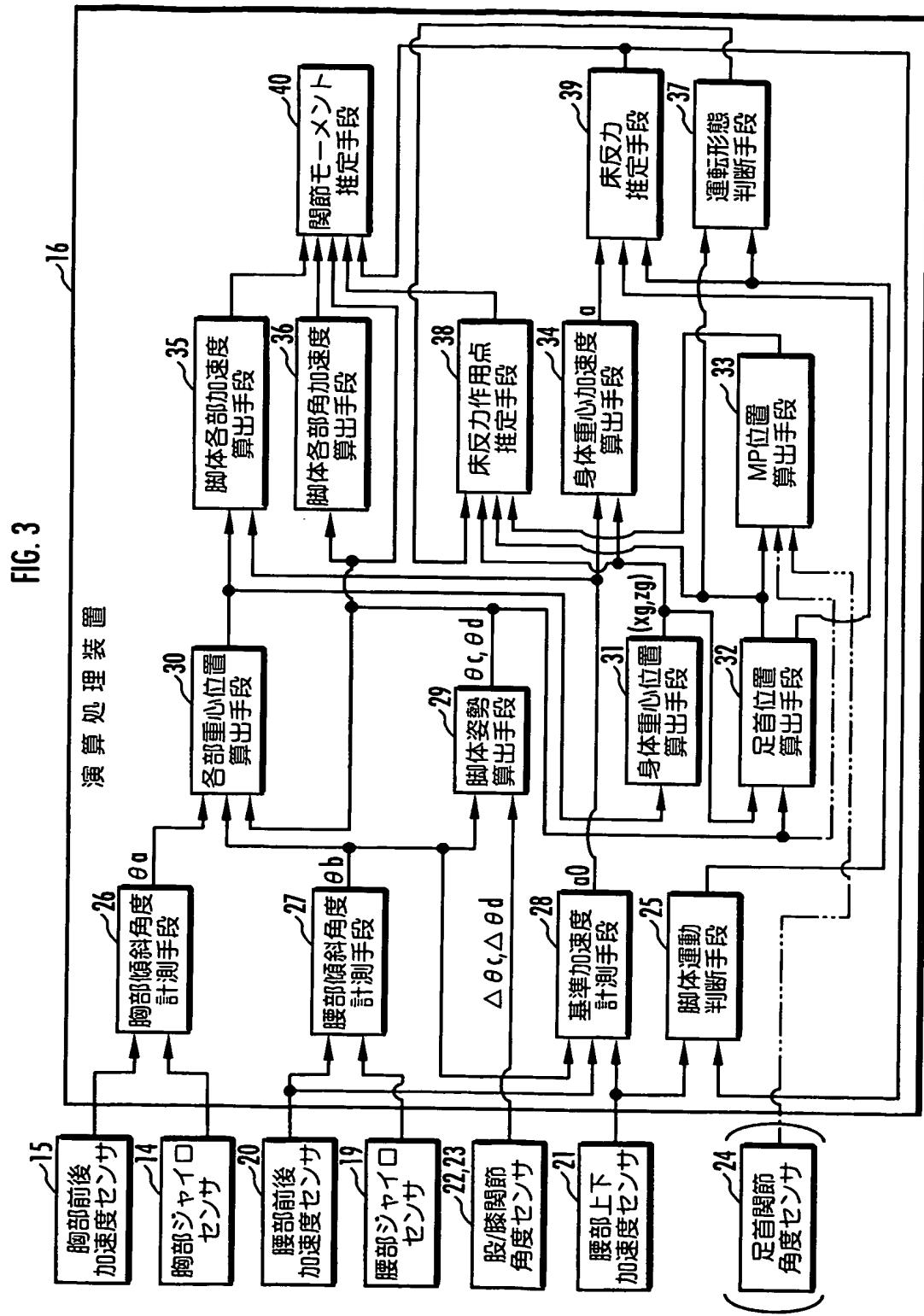
FIG. 1 (b)



2/20

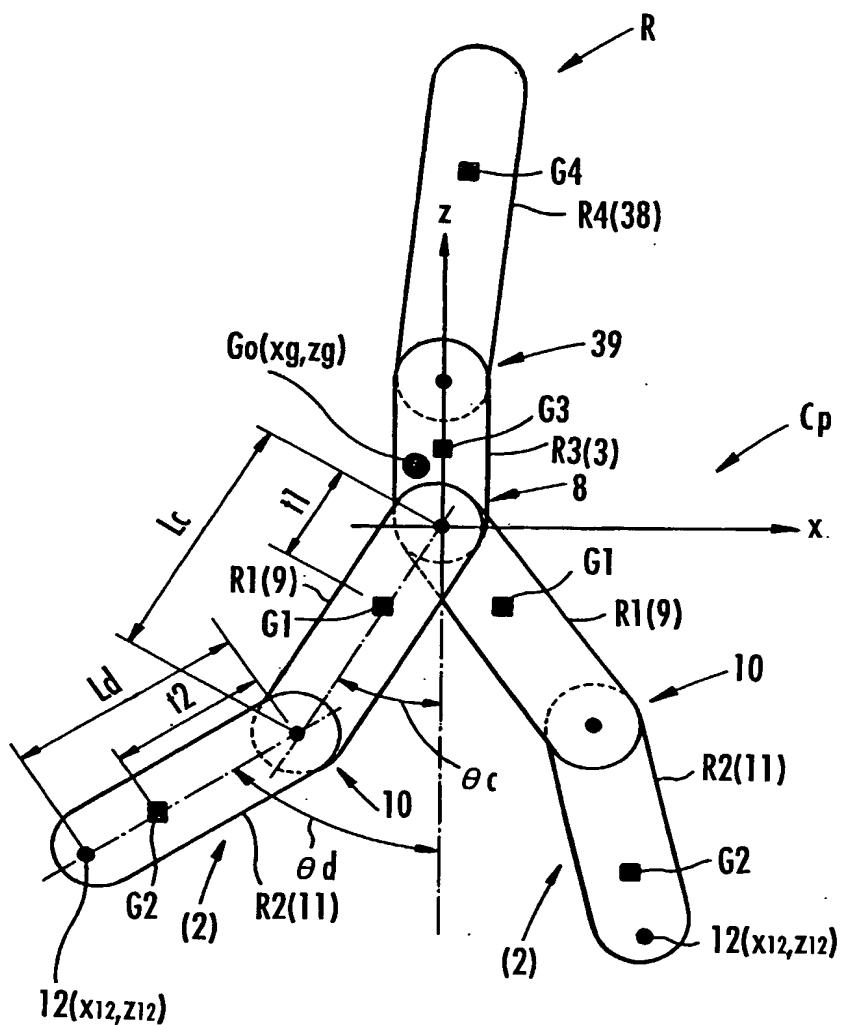
FIG. 2





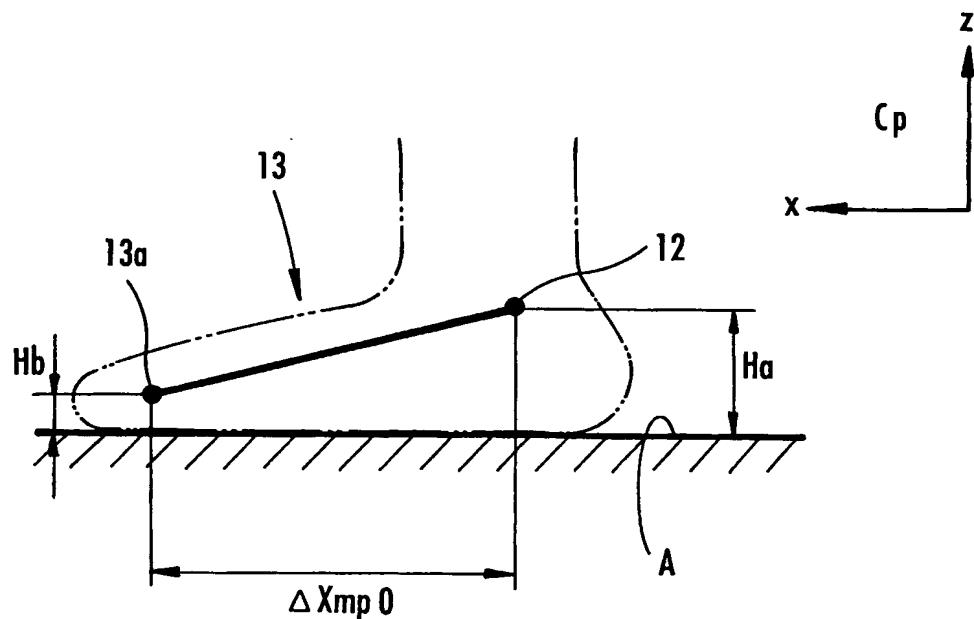
4/20

FIG. 4



5/20

FIG. 5



6/20

FIG. 6 (a)

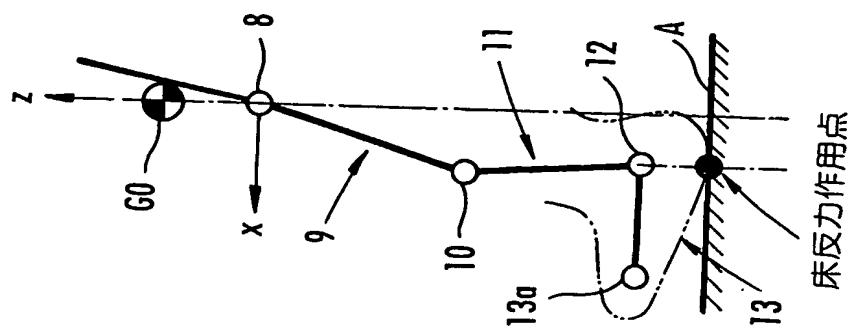


FIG. 6 (b)

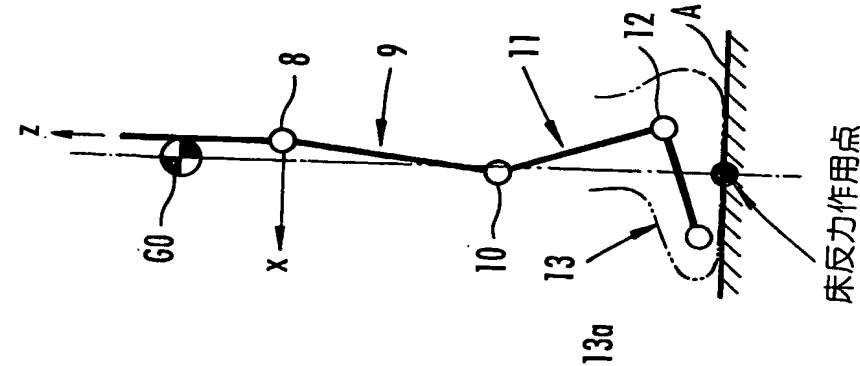
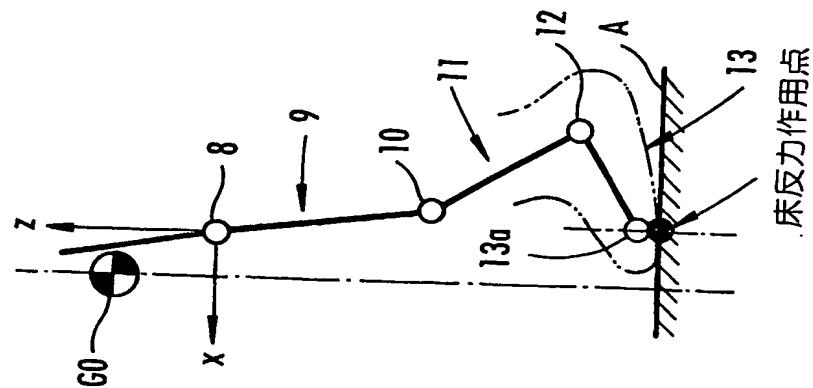


FIG. 6 (c)



7/20

FIG.7

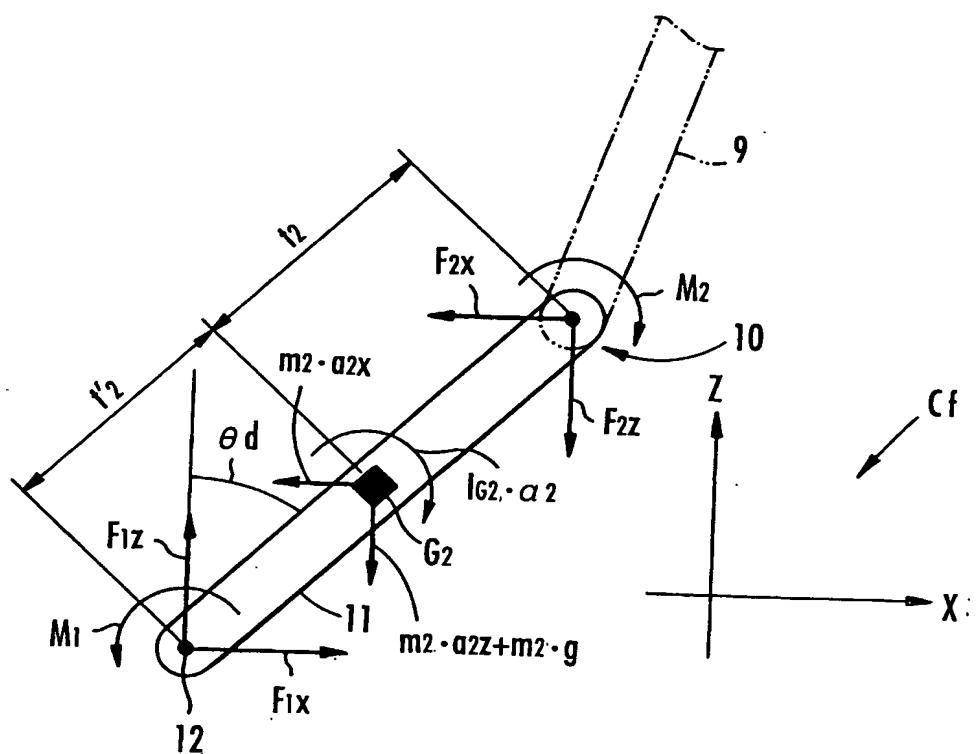
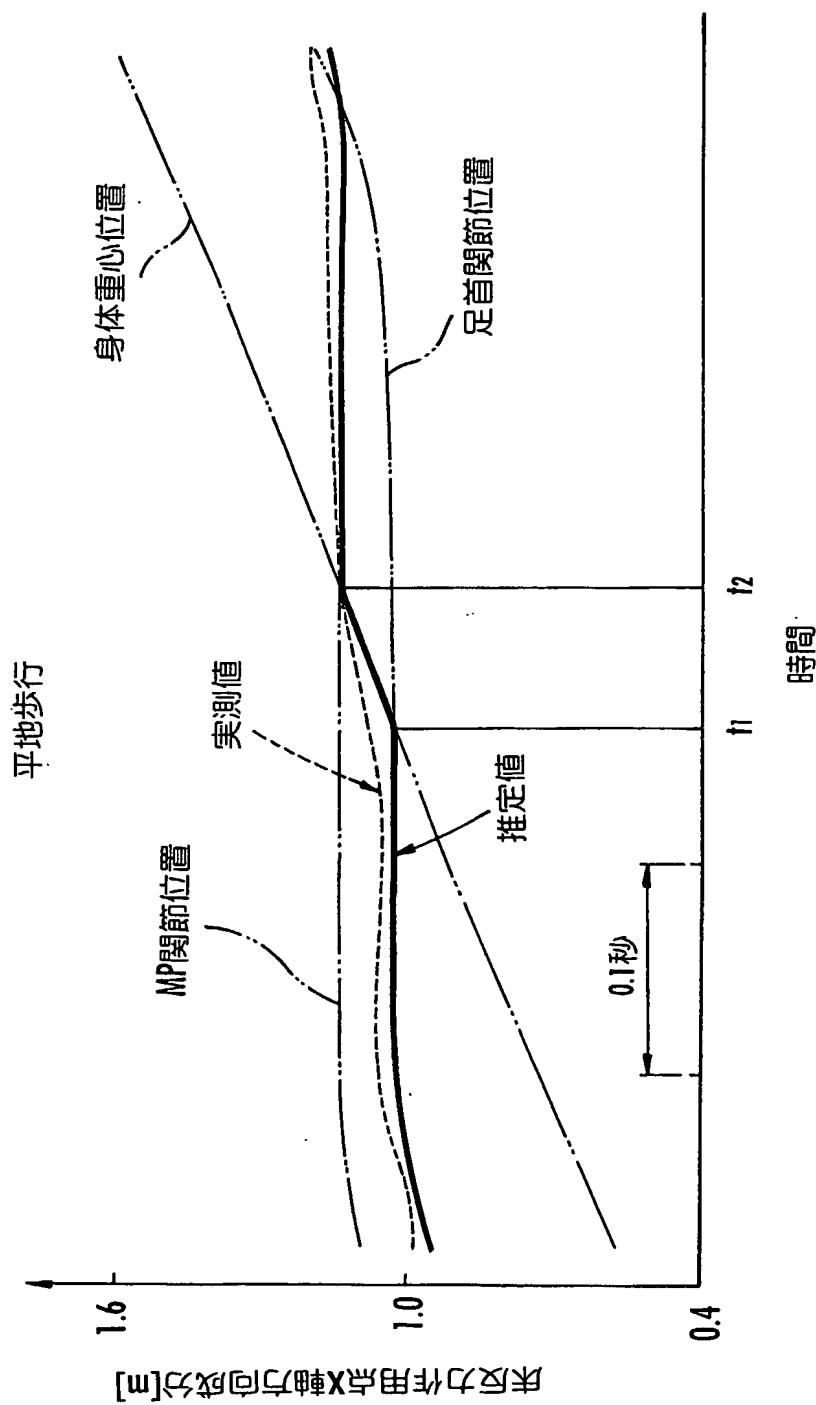
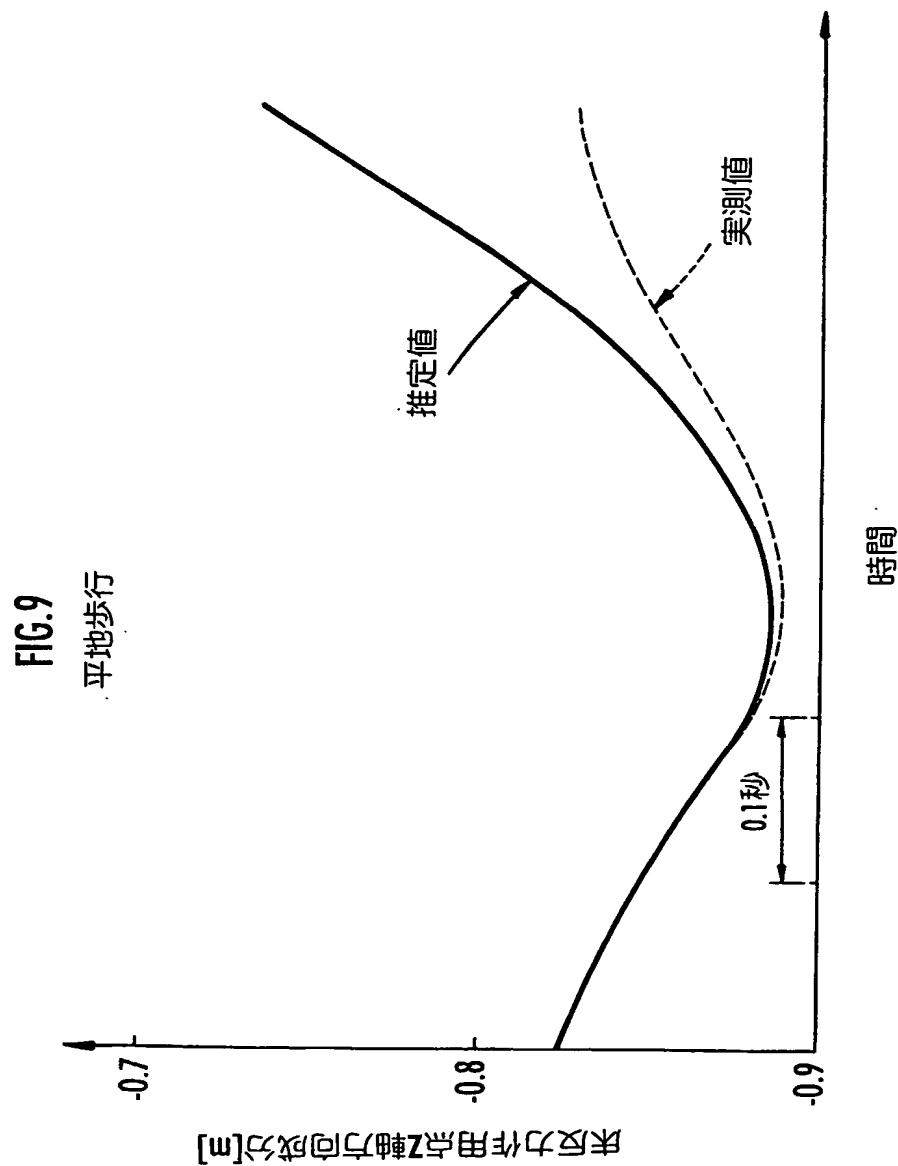


FIG.8

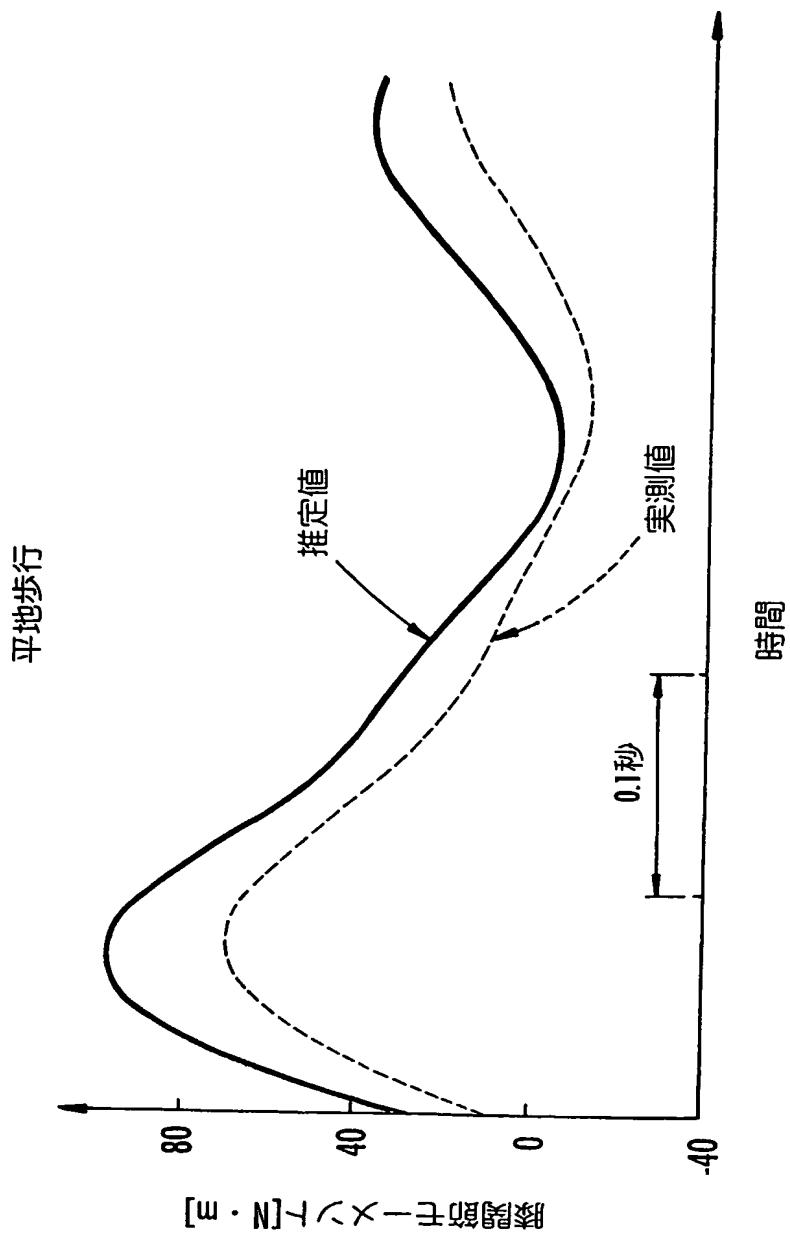


9 / 20



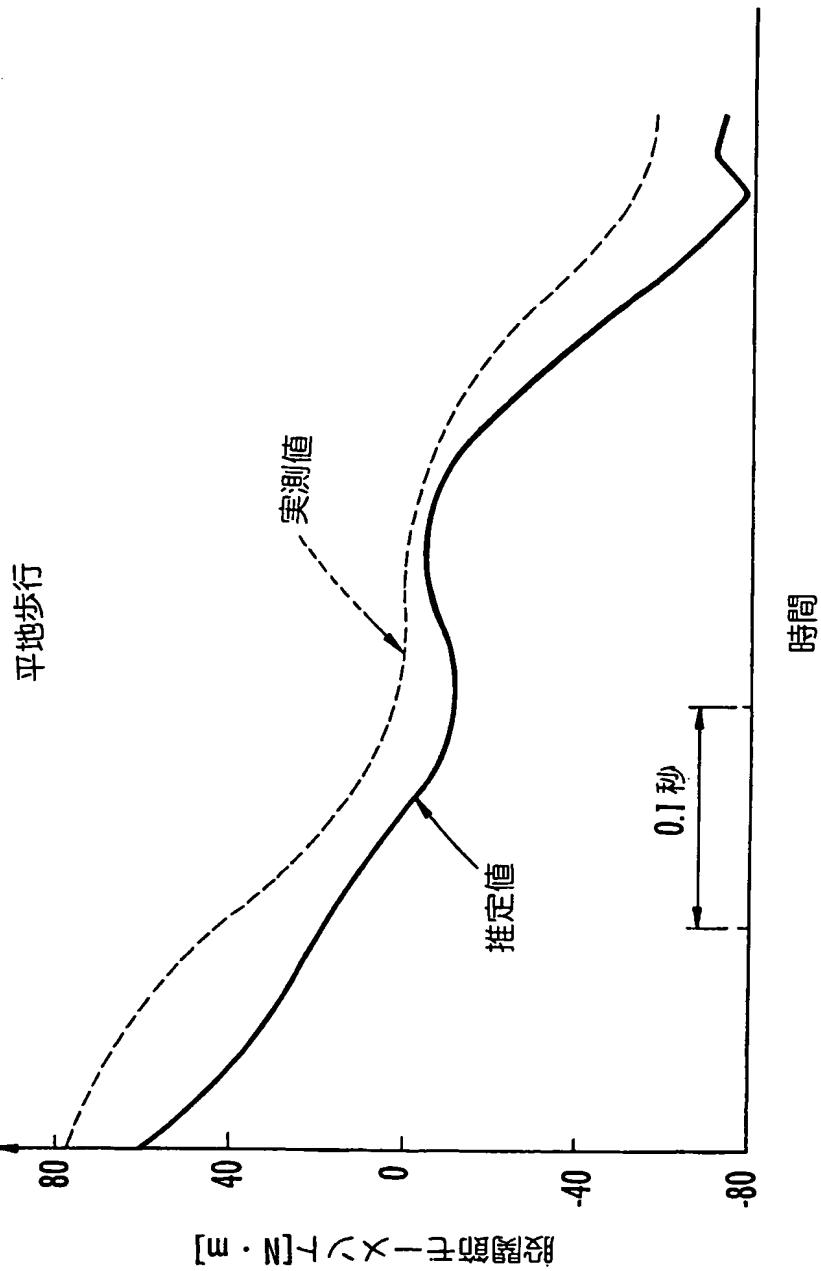
10 / 20

FIG.10



11/20

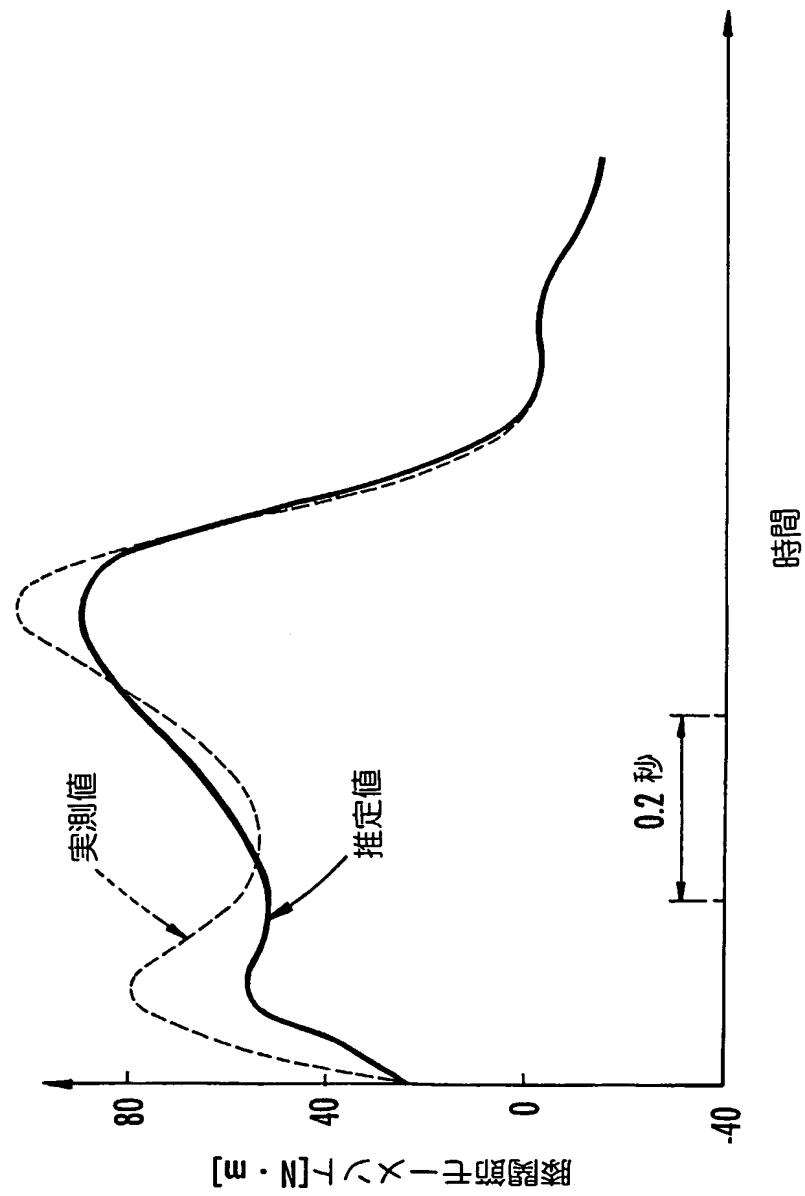
FIG.11



12/20

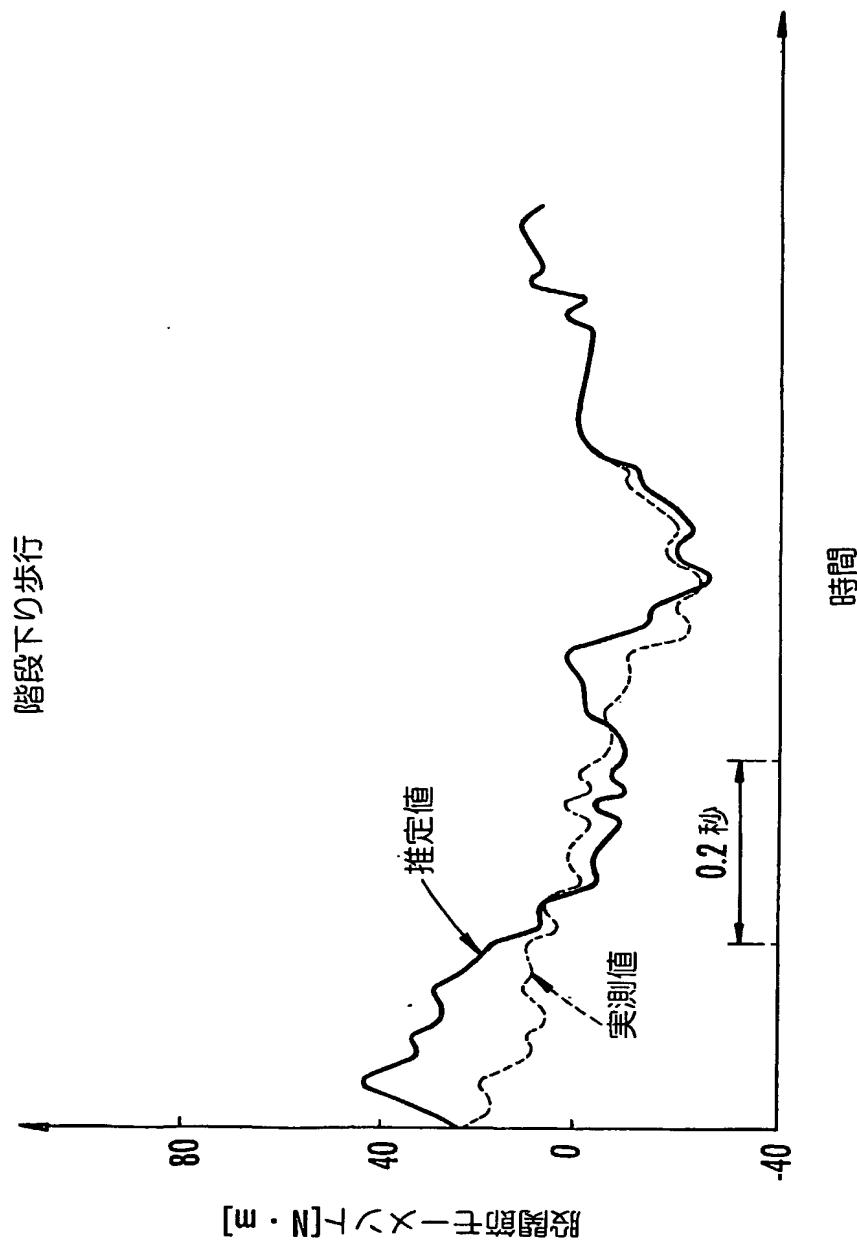
FIG.12

階段下り歩行



13/20

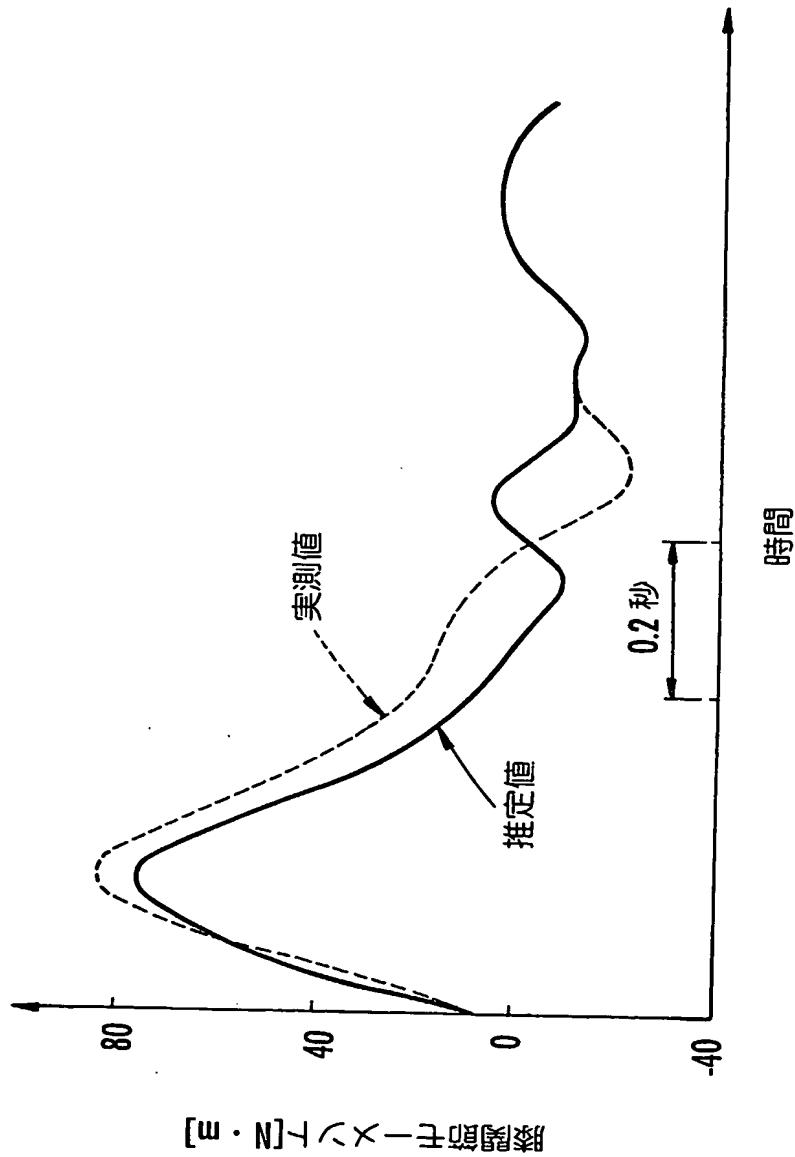
FIG.13



14/20

FIG.14

階段登り歩行



15/20

FIG.15

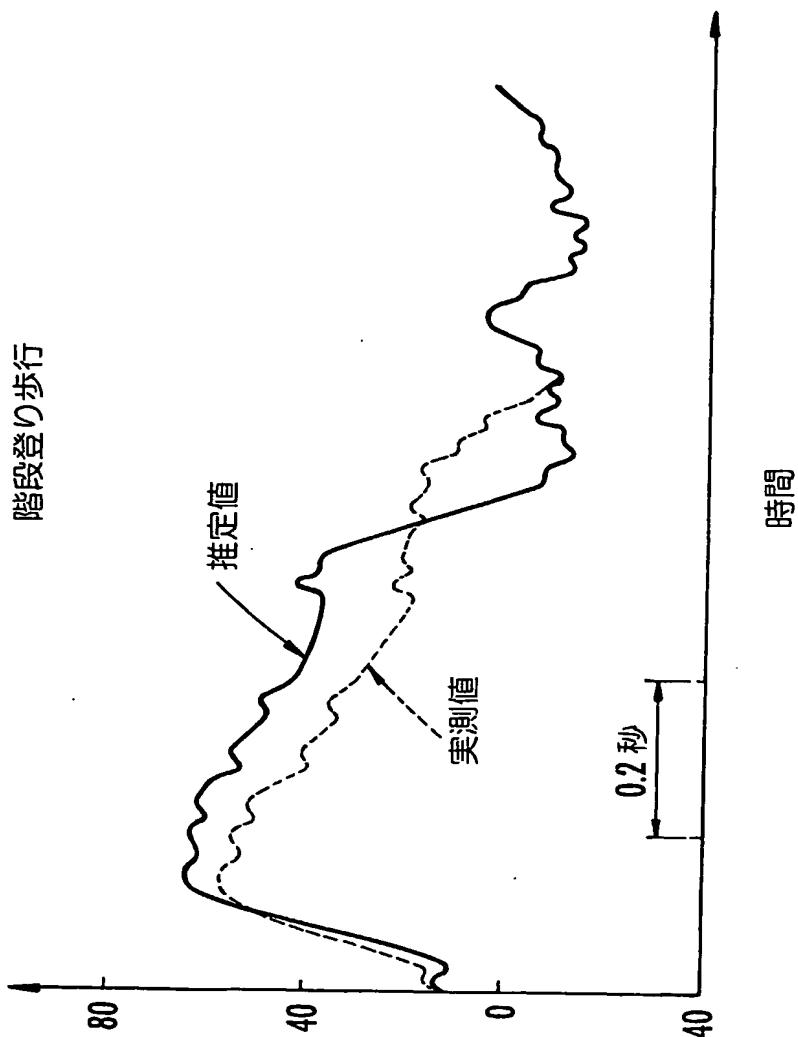
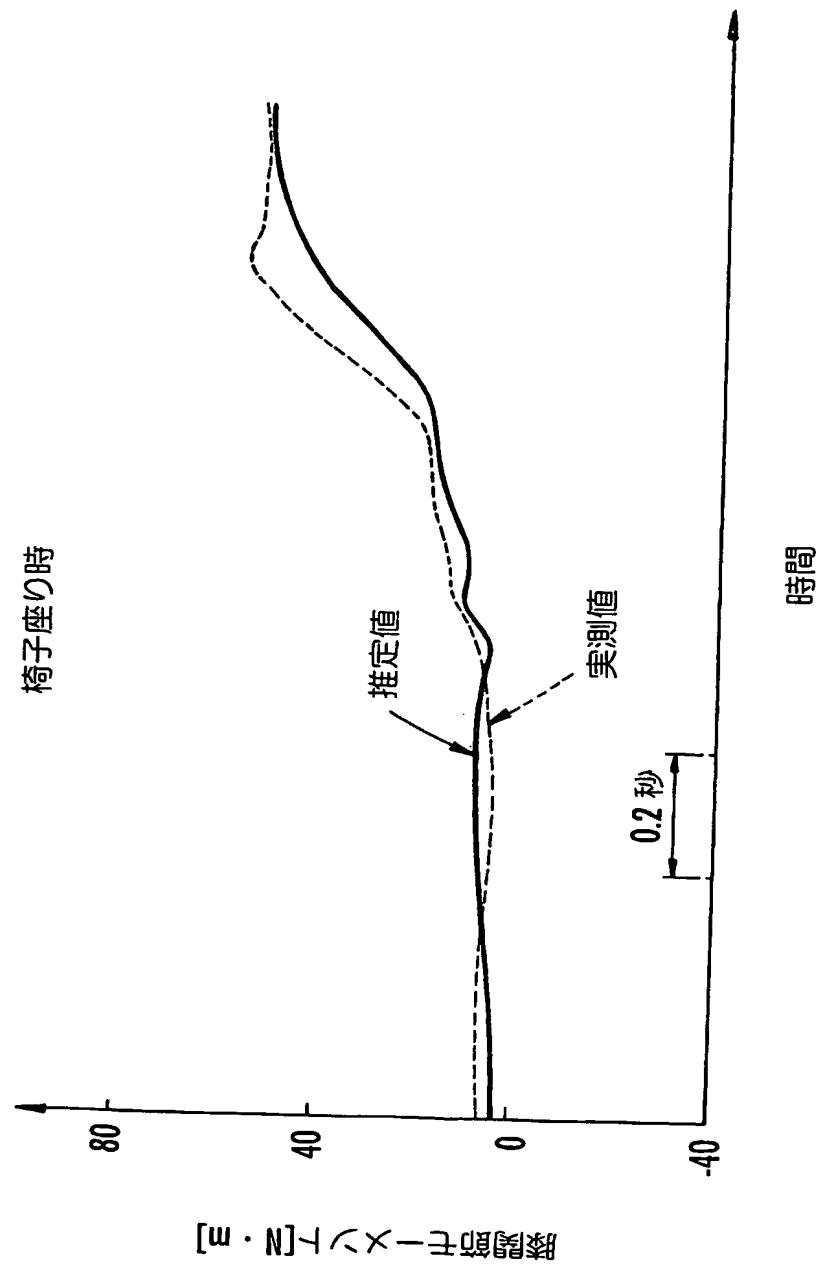
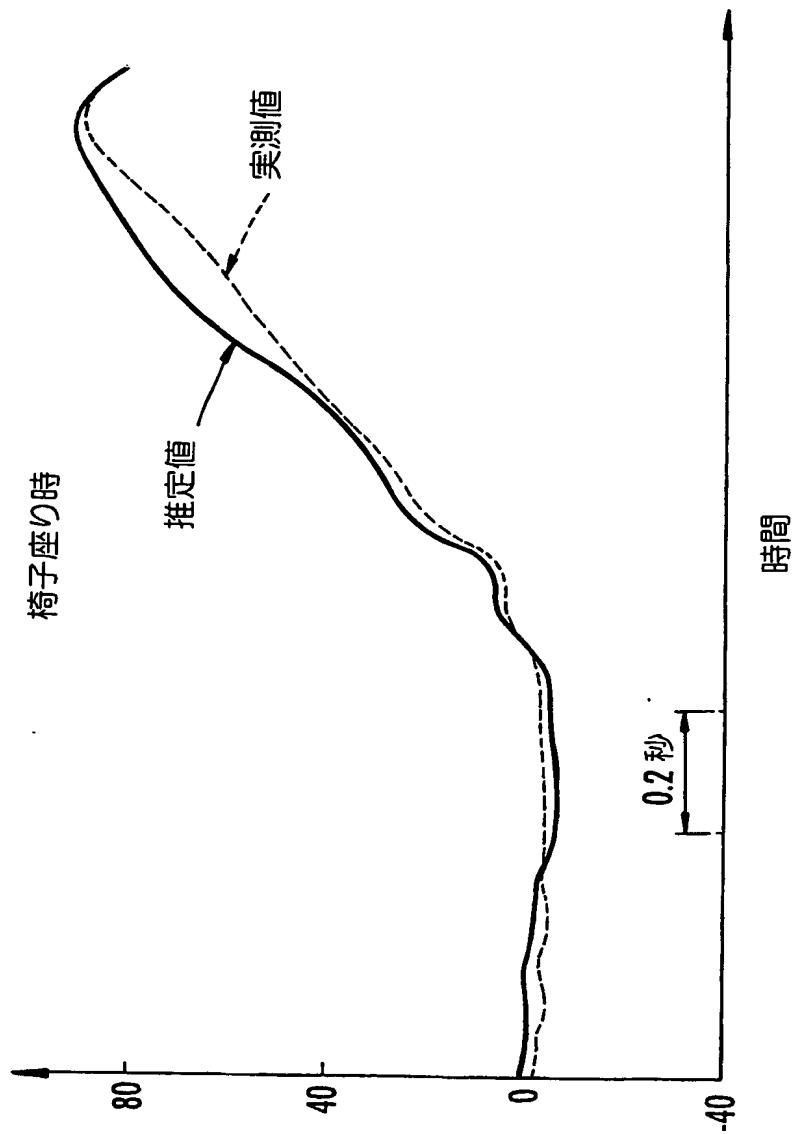


FIG. 16



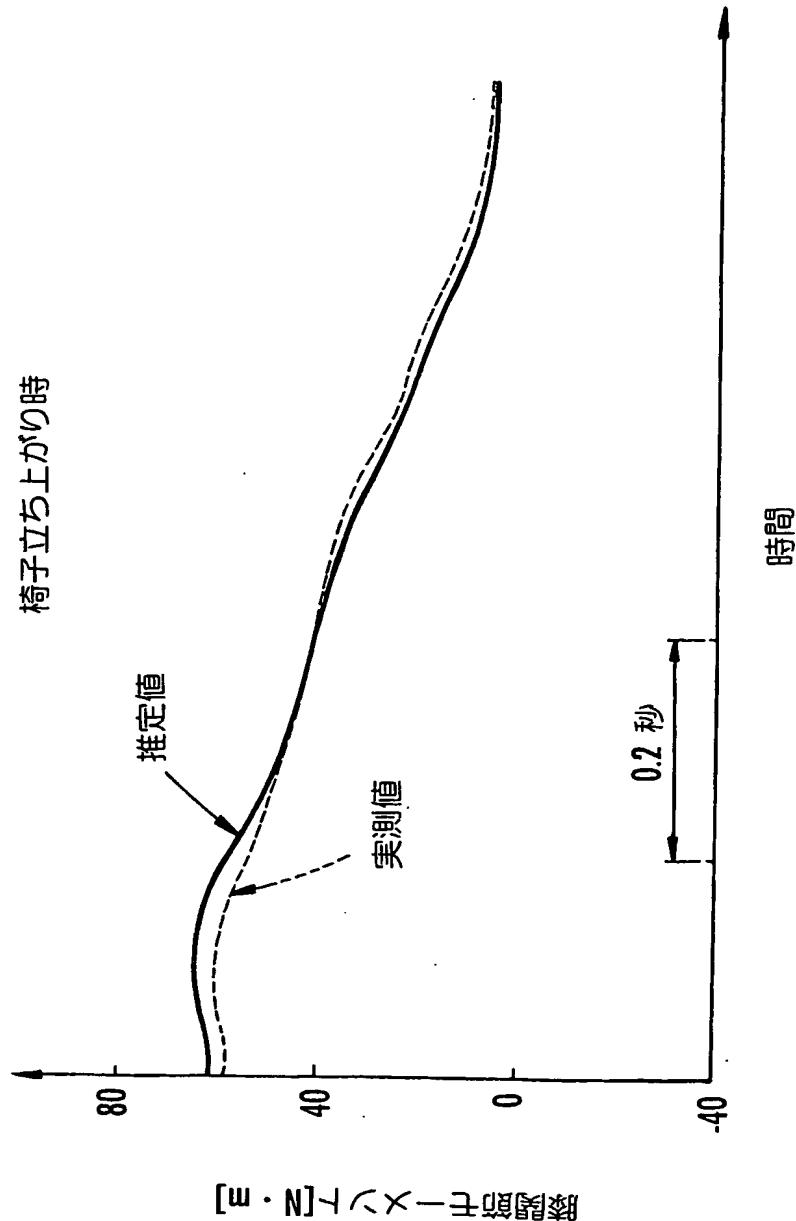
17/20

FIG.17

[m · N] -1 × 10⁻⁴

18 / 20

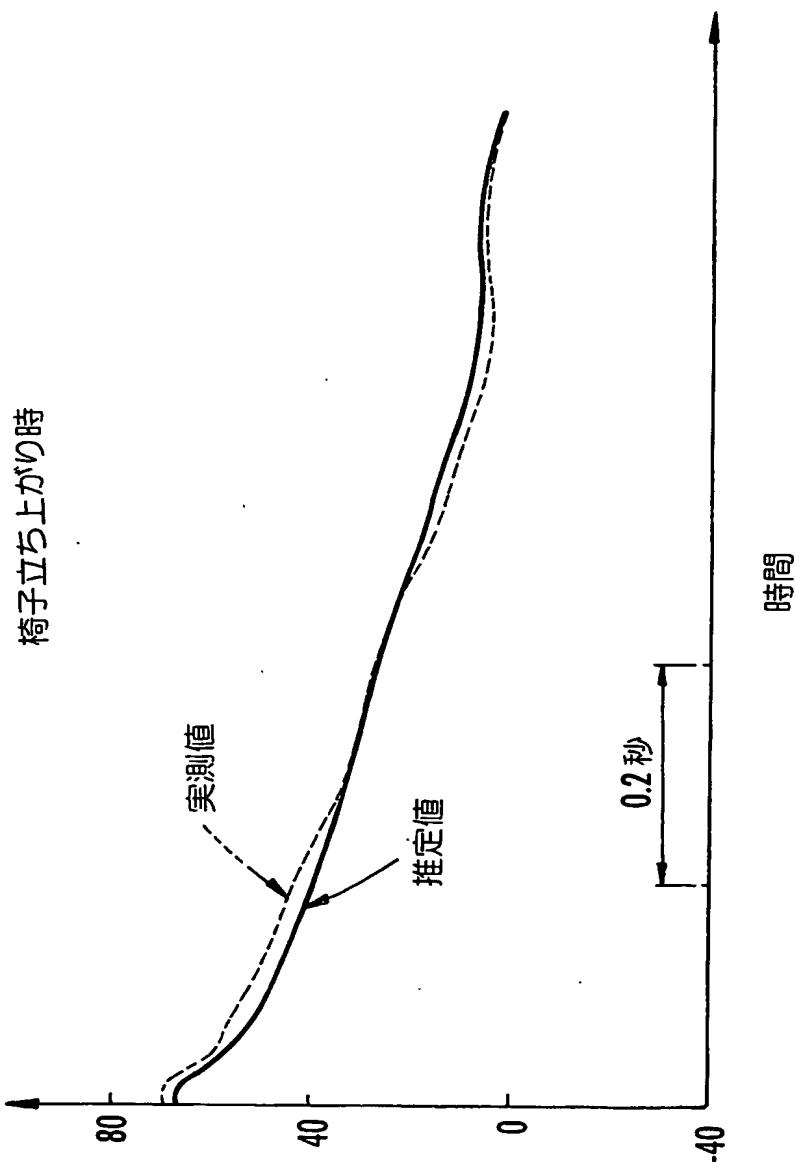
FIG. 18



[M-N] ハーベス

19 / 20

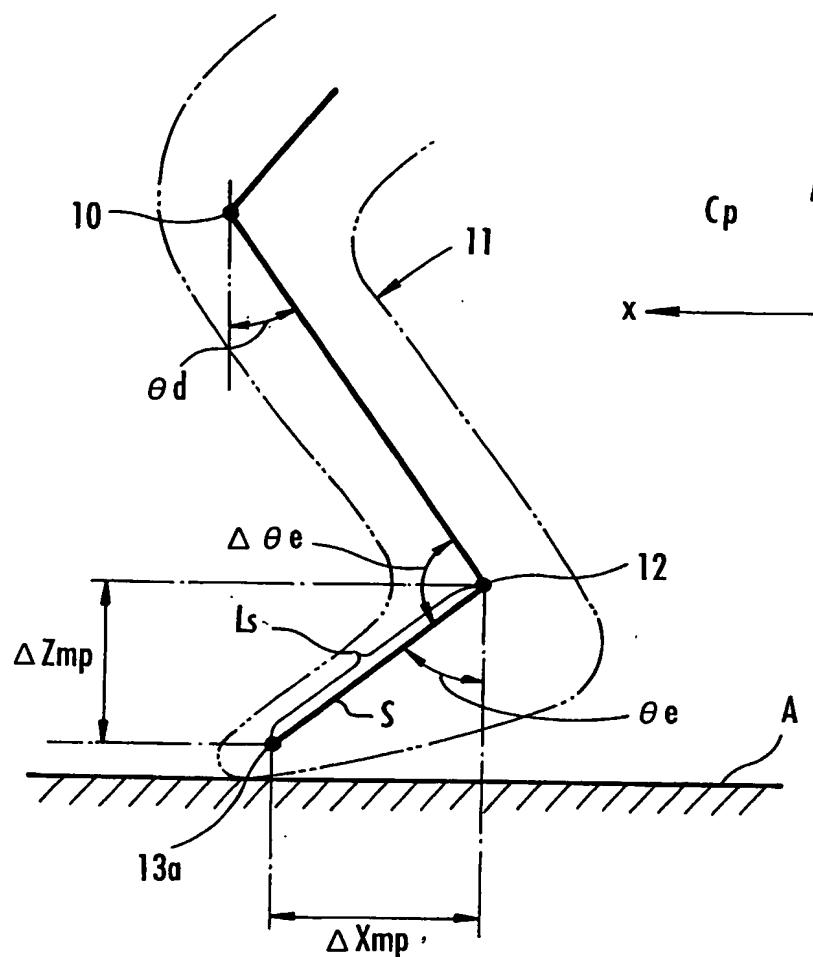
FIG.19



[E・N]トノハス

20/20

FIG. 20



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/004457

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl⁷ B25J5/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl⁷ B25J1/00-21/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1926-1996 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004
Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
JOIS (JICST)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2003-89083 A (Honda Motor Co., Ltd.), 25 March, 2003 (25.03.03), Full text; all drawings & WO 03/02309 A1 & EP 1415770 A1	1-7
P, A	JP 2004-114288 A (Honda Motor Co., Ltd.), 15 April, 2004 (15.04.04), Full text; all drawings & US 2004/116836 A1 & EP 1422129 A2	1-7

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	
"A"	document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E"	earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L"	document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O"	document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P"	document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T"	later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X"	document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y"	document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&"	document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
02 July, 2004 (02.07.04)

Date of mailing of the international search report
20 July, 2004 (20.07.04)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))
Int C1' B25J5/00

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))
Int C1' B25J1/00-21/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年

日本国登録実用新案公報 1994-2004年

日本国公開実用新案公報 1971-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)
JOIS (JICST)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP 2003-89083 A (本田技研工業株式会社) 2003.03.25, 全文, 全図&WO 03/02309 A 1&EP 1415770 A1	1-7
PA	JP 2004-114288 A (本田技研工業株式会社) 2004.04.15, 全文, 全図&US 2004/11683 6 A1&EP 1422129 A2	1-7

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

02.07.2004

国際調査報告の発送日

20.7.2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

八木 誠

3C 9348

電話番号 03-3581-1101 内線 3324